



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JONI JÄRVENSIVU
UUSIUTUVAN ENERGIAN TUOTANTOMAHDOLLISUUDET
LÄNTISEN TAMPEREEN ALUEELLA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Risto Raiko
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 8.11.2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

Järvensivu, Joni: Uusiutuvan energian tuotantomahdollisuudet läntisen Tampereen alueella

Diplomityö, 77 sivua

Tammikuu 2014

Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka

Tarkastaja: professori Risto Raiko

Avainsanat: Uusiutuva energia, tuulivoima, aurinkoenergia, maalämpö, bioenergia, lämpövoimalaitos.

Tässä diplomityössä tarkastellaan uusiutuvien energiavaihtoehtojen hyödyntämistä Läntisen Tampereen Kolmenkulman alueelle seuraavien vuosien aikana rakennettavan pienteollisuus- ja yritysalueen energiantuotannossa. Uusiutuvista energiamuodoista tarkastellaan tuulivoiman, maalämmön, aurinkosähkön, aurinkolämmön sekä bioenergian hyödyntäminen. Aurinkosähkön osalta tarkastellaan keskitettyä aurinkosähkövoimalaa, jonka teho on 1 MW_{dc} . Bioenergian, aurinkolämmön ja maalämmön hyödyntämisen mahdollisuuksia tarkastellaan keskitetyissä järjestelmissä kaukolämmön tuotannossa. Kolmenkulman Alueen lämpötehoksi on määritetty 10 MW ja tarkasteluissa alue oletetaan lämmön suhteen omavaraiseksi.

Maalämmön hyödyntämismahdollisuuksia kaukolämmön tuotantovaihtoehtona Kolmenkulman alueella heikentää keskitetyn maalämpöjärjestelmän edellyttämä suurehko maa-alue. Kolmenkulman alue ei ole myöskään paras mahdollinen tuulivoiman hyödyntämiseen teollisessa kokoluokassa, koska se on jää Pirkkalan lentokentän 18 km suojavaähykkeen sisälle, jolloin luvan saaminen tuulivoimaloiden rakentamiselle alueelle on hyvin epätodennäköistä. Aurinkolämmön osalta voidaan yhteenvetona todeta, että Suomessa aurinkolämmön tuotantokustannukset ovat pääosin kaukolämmön muuttuvia tuotantokustannuksia korkeammat. Eli aurinkolämpö ei ole kannattava tarkasteluvaihtoehto keskitetyn kaukolämmön tuotantoon Kolmenkulman alueella.

Työn lopussa esitellään investointeihin liittyvän kannattavuuslaskennan perusperiaatteet ja laskennassa käytettävät muuttujat. Kannattavuuslaskelmat käydään läpi esimerkinomaisesti aurinkosähköjärjestelmälle ja bioenergiaa hyödyntäville voimalaitoksille kahden eri konseptin osalta: lämpökeskus ja ORC-voimalaitos. Bioenergian osalta konseptivaihtoehtojen kannattavuutta verrataan ns. nollavaihtoehtoon, joka tässä tarkastelussa on normaali kaukolämpö ja normaali verkkosähkö. Koska kaukolämmön hinta sisältää kaukolämpöverkoston rakentamisen ja lämpöhäviöt, arvioidaan nämä kustannukset myös tarkasteltaville konsepteille. Laskelmien tarkoituksena on havainnollistaa energiatuotantolaitoksia koskevan investointilaskennan muuttujia ja laskentaperiaatetta eikä niinkään antaa absoluuttista vastausta eri voimalaitosvaihtoehtojen kannattavuudesta.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Automation Technology

Järvensivu, Joni: The possibilities of renewable energy production in Western Tampere

Master of Science Thesis, 77 pages

January 2014

Major: Power plant and combustion technology

Examiner: Professor Risto Raiko

Keywords: renewable energy, wind power, solar energy, ground heat, bioenergy, thermal power station.

The purpose of this master of science thesis is to consider the possibilities of renewable energy production in a upcoming industry and enterprise park in Kolmenkulma area in Western Tampere. The renewably energy sources considered in this thesis are wind power, solar energy, ground heat and bioenergy. All of the renewable energy power stations are considered to be centralized. The maximum thermal power output is defined to be 10 MW and the Kolmenkulma area is supposed to be thermally self-sufficient.

The potential of the ground heat in centralized district heating is low because the ground heat system requires a large area. Kolmenkulma area isn't the best option for wind power utilization in industrial scale either, because the area is situated within the safety zone of the Pirkkala airport. Authorization to the construction of the wind turbines on the area would be highly unlikely. The production costs of the centralized solar heat are in general higher compared to the conventional forms of district heating. That is, the solar heat is not considered as a viable option for centralized district heating in Kolmenkulma area.

At the end of this thesis are presented the parameters and principles of the profitability calculation of an investment. The profitability calculations and the initial parameters used in the calculations are just fictitious examples. The example calculations are calculated for the photovoltaic system and for the bioenergy power plants using two different scenarios: the heating plant and the ORC-power plant. The viability of the alternatives of the two bioenergy scenarios are compared to the so-called zero option, which in this thesis is determined to be the standard district heat power and standard utility electric power. The price of the district heat power includes the cost and the losses of the district heating network. These costs are also estimated for the two other bioenergy scenarios. The aim of these profitability calculations is to illustrate the principles of the calculations and the parameters, rather than to give an absolute answer on the profitability of the different power plant options.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisessä yliopistossa liittyen uusiutuvan energian tuotantomahdollisuuksiin Läntisen Tampereen alueella.

Tampereella 27.11.2013

Joni Järvensivu

SISÄLLYS

Abstract	iii
Termit ja niiden määritelmät	vii
1 Johdanto	1
2 Uusiutuva energia.....	4
2.1 Uusiutuvat energialähteet.....	4
2.2 Ilmastopolitiikka ja energiatehokkuus	5
2.3 Uusiutuva energia Tampereella: poliittiset päätökset	7
2.4 Uusiutuvan energian tukeminen: syöttötariffit ja investointituet.....	8
2.4.1 Syöttötariffi	8
2.4.2 Investointituet	9
3 Esimerkkejä uusiutuvan energian hyödyntämisestä.....	11
3.1 Porvoo Skaftkärr	11
3.2 Helsinki Östersundom.....	14
4 Aurinkoenergian hyödyntäminen.....	16
4.1 Aurinkosähkö	16
4.1.1 Nykyiset teknologiat ja tulevaisuuden näkymät	17
4.1.2 Aurinkosähköenergian varastointi	19
4.1.3 Aurinkosähkön tuotantopotentiaali.....	21
4.2 Aurinkolämpö	25
4.2.1 Keräinteknologiat.....	25
4.2.2 Keskitetty aurinkolämpöjärjestelmä	27
4.2.3 Aurinkolämmön tuotantopotentiaali	27
4.3 Keskitetty energiatuotantoratkaisu.....	28
5 Tuulivoiman hyödyntäminen	30
5.1 Tuulivoimaprojektin toteutusedellytykset.....	30
5.1.1 Tuulisuus.....	30
5.1.2 Infrastrukturi	31
5.1.3 Maanomistus ja -käyttö, maa-alan tarve sekä ympäristötekijät	31
5.2 Tuulivoimatuotantoon soveltuvien alueiden kartoitus	33
6 Bioenergian hyödyntäminen	37
6.1 Bioenergian lähteet.....	37
6.1.1 Metsäbiomassa.....	37
6.2 Voimalaitostyytit.....	38
6.2.1 Höyryvoimalaitos.....	39
6.2.2 ORC- yhteistuotantovoimalaitos.....	41
6.2.3 Lämpökeskus	43
6.3 Voimalaitosten tehomitoitus	44
6.3.1 Kolmenkulman biovoimalaitoksen mitoitus ja energiantuotantopotentiaali	45
6.4 Biopolttoaineiden polttotavat	46

6.4.1	Arinapoltto	47
6.4.2	Leijupoltto.....	48
7	Maalämmön hyödyntäminen.....	49
7.1	Mitä on maalämpö.....	49
7.2	Maalämpöjärjestelmä	50
7.3	Maalämpöpumpun rakenne ja toimintaperiaate	51
7.4	Maalämpöjärjestelmän sijoitus ja mitoitus.....	53
8	Energiatuotantomuotojen kannattavuus ja taloudellinen tarkastelu.....	55
8.1	Bioenergia	56
8.2	Aurinkosähkö	59
9	Yhteenveto	61
	Lähteet.....	64

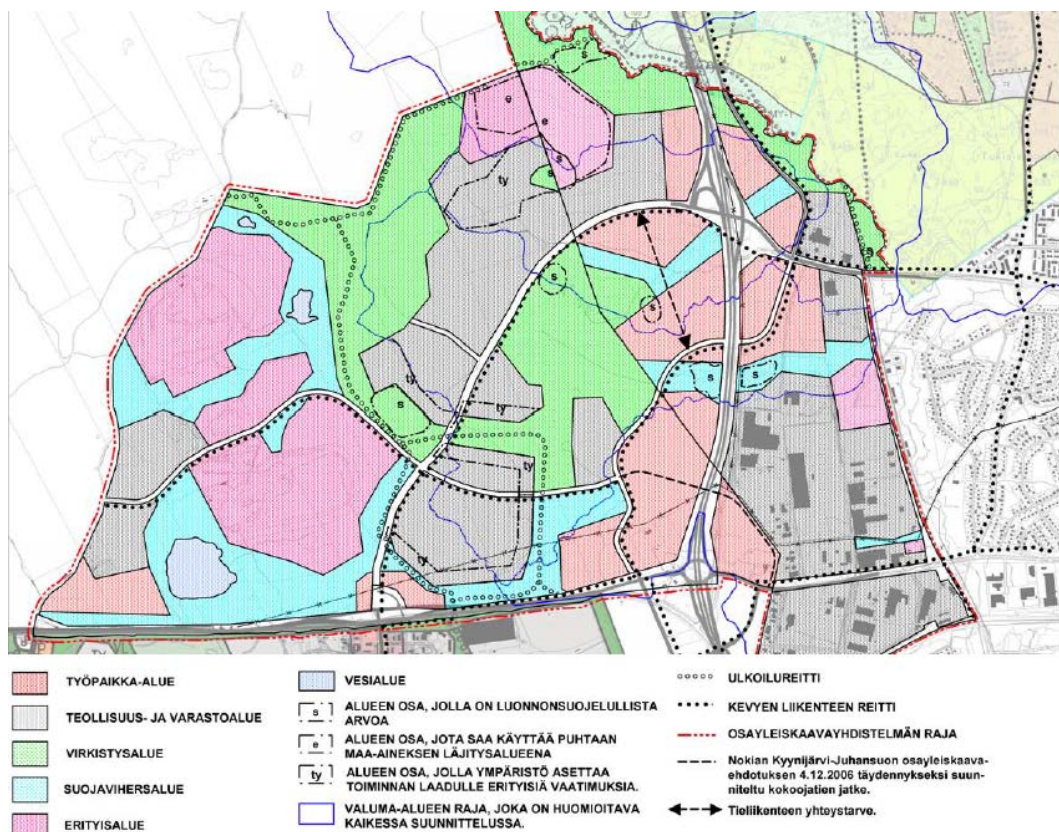
TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Aurinkovakio	Auringonsäteilyn kokonaistehoa pinta-alayksikköä kohti maan etäisyydellä auringosta
Atsimuuttikulma	Atsimuuttikulma eli suuntakulma on vaakatason ja laitteen pinnan välinen kulma
Biomassa	Luonnosta saatavat uusiutuvat raaka-aineet, kuten esimerkiksi peltokasvit, puut ja biojätteet
COP-luku	Ilmoittaa lämpöpumppujen hyötysuhteen eli kuinka paljon lämpöpumppu kuluttaa sähköenergiaa tuotettua lämpöenergiaa kohden
CHP-laitos	Combind heat and power. Yhdistetty sähkön ja lämmön tuotantolaitos
Clausius-Rankine-kiertoprosessi	Höyryvoimalaitoksissa hyödynnettävä kiertoprosessi
Cleantech	Suomeksi puhdas teknologia. Mm. palveluita ja teknologiaa, jolla pyritään vähentämään negatiivista ympäristövaikutusta
Huipunkäyttöaika	Ajan pituus, joka kuluisi vuodessa tuotetun energiamäärän tuottamiseen, kun voimalaitos toimisi koko ajan maksimitehollaan.
$i \cdot m^3$	Irtokuutiometri
Kallistuskulma	Vaakatason ja laitteen pinnan välinen kulma
Lämpökeskus	Pelkästään kaukolämpöä tai höyryä tuottava voimalaitos
Metsähake	Mm. hakkuutähteistä tai kokopuusta hakettamalla tehtyä metsäpolttoainetta

ORC-prosessi	Organic rankine cycle. Rankine- kierto-prosessi, jossa veden sijaan kiertoaineena käytetään sopivaa orgaanista nestettä
Pn-liitos	Kahden eritavoin seostetun puolijohteen välinen liitos aurinkokennossa
PVGIS -tietokanta	Photovoltaic geographical information system
Pysyvyyskäyrä	Pysyvyyskäyrä ilmaisee tehontarpeen pysyvyyden, eli ajan jonka tehontarve on vähintään tietyn suuruinen
Rakennusaste	Kuvaa tuotetun sähköenergian ja kaukolämmön suhdetta yhteistuotantovoimalaitoksissa
Sankey-diagrammi	Kuvaa viitteellisesti voimalaitoksen energiavirtojen jakautumista lämmön, sähköön ja häviöiden välille
Syöttötariffi	Valtion ohjauskeino, jolla pyritään vaikuttamaan sähkön tuotantorakenteeseen
Tasokeräin- ja työhjiöputkikeräin	Aurinkolämpöjärjestelmän komponentti, jolla auringon säteilyenergiaa sidotaan väliaineeseen
Tehollinen lämpöarvo	Ilmaisee polttoaineen palamisessa muodostuvan lämmön energiamäärän polttoaineen massayksikköä kohden
Uusiutuva energia	Energiatuotantomuodot, joissa primäärienergian lähdettä voidaan inhimillisillä mittasuhteilla katsottuna pitää loputtomana
Valosähköinen ilmiö	Sähkömagneettisen säteilyn, esimerkiksi auringon säteilyn, kyky irrottaa aineesta elektroneja energian kuljettajiksi

1 JOHDANTO

Kolmenkulma on Nokian, Tampereen ja Ylöjärven kaupunkien yhteinen yritysalue, jonne seuraavien vuosien aikana tullaan rakentamaan merkittävä pienteollisuus- ja yritysalue. Alueen nimi viittaa sen sijaintiin kolmen valtatie ja kolmen kaupungin risteyskohdassa. Kolmenkulman alue tulee olemaan seutukunnan laajin yritysalue, kokonaispinta-alaltaan uusi kaavoitettava alue on runsaat 600 hehtaaria. Yhdessä jo rakennettujen yritysalueiden kanssa Kolmenkulma muodostaa yhteensä yli 850 hehtaari yrityskeskittymän, josta noin 600 hehtaaria sijaitsee Nokian puolella. Tampereella alueesta on yli 200 hehtaaria ja Ylöjärvellä noin 50 hehtaaria. Alueella tulee olemaan monen kokoisia tontteja pienistä erittäin suuriin. Tontteja on kaavailtu kaupalle, teollisuudelle, toimistoille ja logistiikalle. Alueen on kaavailtu tarjoavan tulevaisuudessa noin 10 000 työpaikkaa, joista Nokian osuus on noin puolet. [46,47]



Kuva 1. Kolmenkulman yleiskaavatilanne vuonna 2007.

Kolmenkulman alueelle kaavaillaan lisäksi maakunnallisena pilot-hankkeena kansallisesti merkittävää uusiutuvan energian sekä biomassojen jalostuksen tuotantoaluetta ja kyseiseen tuotantoon liittyvää cleantech-tyyppistä yritystoimintaa. Uusiutuvien energiamuotojen hyödyntämismahdollisuuksista tullaan tässä työssä tarkastelemaan tuuli-voima, maalämpö, aurinkosähkö ja aurinkosähkön varastointi, aurinkolämpö sekä bioenergian hyödyntäminen. Aurinkosähkön osalta tarkastellaan aurinkosähkövoimalaa, jonka teho on 1 MW_{dc} ja siihen soveltuvaa sähkön varastointijärjestelmää. Bioenergian, aurinkolämmön ja maalämmön hyödyntämisen mahdollisuuksia tarkastellaan keskitettyinä järjestelminä kaukolämmön tuotannossa. Bioenergian, aurinkolämmön ja maalämmön osalta tarkastellaan konsepteja, joissa Kolmenkulman alue on omavarainen lämmön suhteen, eli alueelle ei tuoda eikä alueelta viedä lämpöä ulospäin. Alueen lämmön maksimitehotarpeeksi on määritetty $10 \text{ MW}_{\text{th}}$. Bioenergian osalta tarkasteltavat konseptit ovat:

1. Hakelämpökeskus peruskuormalle + pellettilämpökeskus huippukuormalle
2. Haketta hyödyntävä ORC-voimalaitos peruskuormalle + pellettilämpökeskus huippukuormalle

Luvussa kaksi määritetään uusiutuvan energian käsite ja esitellään uusiutuvan energian lähteitä sekä sen hyödyntämisen vaikutuksia. Uusiutuvaan energian vaikuttavista ilmastopoliittisista toimenpiteistä esitellään EU:n ilmasto- ja energiapaketti, jonka tavoitteiden mukaisesti Suomi pyrkii vuoteen 2020 mennessä vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä, lisäämään uusiutuvien energialähteiden osuutta energian loppukulutuksessa sekä parantamaan energiatehokkuutta. Tampereen osalta käydään läpi Tampereen sähkölaitoksen omat tavoitteet uusiutuvan energian käytön osalta. Luvun lopussa esitellään uusiutuvan energian tukemiseen tähtäävät syöttötariffit ja investointituet.

Luvussa kolme esitellään kaksi meneillään olevaa uusiutuvaan energiaan liittyvää hanketta Suomesta; Porvoon Skaftkärr sekä Helsingin Östersundom. Skaftkärr hankkeen tärkeimpiä tavoitteita on luoda valtakunnallisesti hyödynnettävissä oleva konsepti, jonka avulla voidaan jatkossa rakentaa mahdollisimman energiatehokkaita asuinalueita. Hankkeessa pyritään mm. kaavoitusprosessin kehittämiseen energiatehokkuus paremmin huomioivaksi sekä LivingLab-toiminnan kehittämiseen. Östersundomin energia-hankkeessa kaavaillaan kymmenen tuhannen asukkaan vihreän energian puutarhakaupunginosaa, joka olisi nettonollaenergia-alue eli siellä tuotettaisiin uusiutuvaa energiaa vastaava määrä kuin alueen rakennuksissa kulutettaisiin.

Luvussa neljä käydään läpi aurinkoenergian hyödyntämistä aurinkosähkön- ja lämmön tuotannossa. Luvussa esitellään aurinkosähkön tuotantoteknologioita sekä aurinkosähköjärjestelmän komponentit. Lisäksi käydään läpi perinteisen piiaurinkokennon rakenne ja toimintaperiaate. Aurinkosähkön tuotantoon liittyen esitellään aurinkosähkön tuotantopotentiali Tampereen leveysasteella sekä aurinkosähköenergian varastointimahdollisuuksia. Aurinkolämmön osalta käydään läpi niinikään aurinkolämmön tuotan-

toteknologiat, varastointimahdollisuudet sekä tuotantopotentiaali/kannattavuus kaukolämmön tuotannossa.

Luvussa kuusi esitellään tuulivoimaprojektin toteutusedellytyksiä: alueen tuulisuus, infrastruktuuri, maanomistus- ja käyttö, maa-alan tarve sekä ympäristötekijät. Luvussa esitellään Pirkanmaan liiton tuulivoimaselvitys, jonka tavoitteena on ollut löytää Pirkanmaalla tuulivoimatuotantoon parhaiten soveltuvia alueita. Pirkanmaan liiton tuulivoimaselvityksen pohjalta arvioidaan lopuksi Kolmenkulman alueen soveltuvuutta tuulivoimatuotantoon.

Luvussa kuusi esitellään bioenergian lähteitä, joista tarkemmin käydään läpi metsäbiomassoihin lukeutuvat metsähake sekä puupelletit. Voimalaitostyypeistä esitellään pelkästään kaukolämpöä tuottava lämpökeskus sekä ORC-yhteistuotantovoimalaitos. Luvussa esitellään voimalaitoksen tehomitoitus sekä arvioidaan Kolmenkulman alueen lämmöntuotannon vuosivaihtelua ja jakautumista huippu- ja peruskuormalaitosten kesken. Biopolttoaineiden polttotavoista käydään läpi arinapoltto sekä leijupoltto.

Luvussa seitsemän esitellään mitä maalämpöjärjestelmän komponentit sekä toimintaperiaate. Luvussa käydään läpi myös maalämpöjärjestelmän mitoitus sekä sijoitusta. Luvussa kahdeksan esitellään energiainvestointeihin liittyvien kustannuslaskennan perusmenetelmät sekä käytettävät laskenta-arvot. Luvussa perehdytään tarkemmin edellä mainituista energiatuotantomuodoista aurinkosähkön sekä bioenergian kannattavuuteen ja taloudelliseen tarkasteluun.

2 UUSIUTUVA ENERGIA

2.1 Uusiutuvat energialähteet

Uusiutuvaksi energiaksi luetaan energiatuotantomuodot, joissa primäärienergian lähdettä voidaan inhimillisillä mittasuhteilla katsottuna pitää loputtomana. Uusiutuvaa energiaa ovat aurinko-, tuuli-, vesi- ja bioenergia, maalämpö sekä aalloista ja vuoroveden liikkeestä saatava energia. Bioenergiassa auringon energia sitoutuu ensin yhteyttämisen välityksellä kasvimassaan, jota sitten käytetään energialähteenä. Bioenergian lähteitä ovat puuperäiset polttoaineet, peltobiomassat, biokaasu ja kierrätyspolttoaineiden kuten yhdyskuntajätteen biohajoava osa. [1]

Bioenergiaa lukuun ottamatta uusiutuvista energialähteistä ei vapaudu ilmaan kasvihuonekaasuina tunnettuja hiilidioksidi-, metaani- tai dityppidioksidipäästöjä. Biopolttoaineiden hyödyntämisessä vapautuvien hiilidioksidipäästöjen katsotaan lukeutuvan osaksi luonnon omaa hiilen kiertokulkua, joten niiden ei katsota vaikuttavan kasvihuoneilmiötä lisäävästi. Luonnon tasapainon voidaan katsoa säilyvän mikäli biomassoja käytetään korkeintaan saman verran kuin niitä syntyy. Kaikkea uusiutuvaa energiaa pidetään ilmastoneutraalina energiatuotantomuotona. [1]

Uusiutuvan energian käyttöön vaikuttavat EU:ta koskevat yhteiset päätökset ja direktiivit, kuten kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen tähtäävä päästökauppadirektiivi sekä Suomen omat energia- ja ilmastopoliittiset linjaukset. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen on yksi keskeinen syy uusiutuvan energian käytön lisäämiselle, mutta uusiutuvilla energialähteillä voidaan katsoa olevan merkitystä myös mm. seuraavilla energiastrategian toimenpidealueilla:

- bioenergian ja muun kotimaisen energian käytön edistäminen
- tutkimukseen ja tuotekehitykseen panostaminen
- energiasektorin huoltovarmuuden ylläpitäminen

Taulukko 1. Uusiutuvat energialähteet Suomessa primäärienergiana vuonna 2005 ja vuoden 2020 arvio. [3]

Uusiutuvat energialähteet Primäärienergiana	2005 (TWh)	2020 (TWh)	Muutos (TWh/%-yksikköä) 2005 => 2020
Jäteliemet	37	38	1,1
Teollisuuden tähdepuu	20	19	-1,8
Vesivoima (normalisoitu)	13,6	14	0,6
Tuulivoima	0	6	5,8
Metsähake	6	25	18,9
Puun pienkäyttö	13	12	-0,5
Lämpöpumput	2	8	6,1
Liikenteen biopolttoaine	0	7	6,5
Biokaasu	0	1	0,7
Pelletit	0	2	1,6
Kierrätyspolttoaineet, RES-osuus	2	2	0,0
Muu uusiutuva, mm. aurinkosähkö jne.	0,4	0,4	0,0
Yhteensä	94	134	39,2
Uusiutuvien osuus loppukulutuksesta, toteutunut / arvio	28,5%	38%	9,5%

2.2 Ilmastopolitiikka ja energiatehokkuus

Ilmastopolitiikka muodostuu päätöksistä ja toimista, joilla pyritään säilyttämään maapallon ilmastojärjestelmä vakaana siten, että ihmiskunta ei aiheuta siinä vaarallista häiriintymistä. Toisena tavoitteena on mahdollisimman hallittu sopeutuminen ilmaston joka tapauksessa tapahtuvaan muutokseen. [1] Euroopan unionin ilmastopolitiikka, Kioton pöytäkirja ja YK:n ilmastopöytäkirja asettavat kansainväliset puitteet Suomen ilmastopolitiittisille toimille. Ilmastopolitiikassa Suomi toimii osana Euroopan unionia. EU on asettanut erikseen konkreettiset, toistaiseksi yksipuoliset tavoitteet vuodelle 2020 päästökauppaa, päästökaupan ulkopuolisia aloja sekä uusiutuvan energian lisäämistä koskevilla säädöksillään. Suomen hallituksen vuonna 2008 laatimassa pitkän aikavälin ilmas-

to- ja energiastategiassa tarkastellaan keinoja, joilla voidaan täyttää EU:n ilmasto- ja energiapaketin mukaiset vuoteen 2020 ulottuvat tavoitteet. Strategiassa käsitellään ilmasto- ja energiapoliittisia toimenpiteitä yksityiskohtaisesti vuoteen 2020 ja viitteenomaisesti aina vuoteen 2050 asti. [1]

EU:n ilmasto- ja energiapaketin tavoitteiden mukaisesti jäsenmaat vähentävät kasvihuonekaasupäästöjään vähintään 20% vuoteen 1990 verrattuna, uusiutuvien energialähteiden osuus nostetaan keskimäärin 20%:iin EU:n energian loppukulutuksesta ja energiatehokkuutta parannetaan keskimäärin 20% verrattuna kehitykseen, joka toteutuisi ilman uusia toimenpiteitä. Nämä tavoitteet on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. EU:n sekä Suomen omat energia- ja ilmastotavoitteet vuodelle 2020. [2]

Tavoitteet vuodelle 2020	EU	Suomi
Kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen ¹⁾	-20 %	EU-tason tavoite
Päästökauppasektorin päästöt ²⁾	-21 %	EU-tason tavoite
Päästökaupan ulkopuolisen sektorin päästöt ²⁾	-10 %	-16 %
Uusiutuvien energialähteiden osuus energian loppukulutuksesta	20 %	38 %
Biopolttoaineiden osuus tieliikenteen polttoaineista	10 %	20 %
Energiatehokkuuden parantaminen ³⁾	+20 %	EU-tason tavoite

1) vertailuvuosi 1990

2) vertailuvuosi 2005

3) verrattuna vuonna 2007 arvioituun kehitykseen

Päästökauppasektorin kasvihuonekaasujen kokonaismäärälle on päästökauppajärjestelmässä asetettu sitova yläraja. Näin ollen järjestelmä varmistaa, että päästökauppasektori (muun muassa sähköntuotanto, energiavaltainen teollisuus ja osa kaukolämmön tuotannosta) täyttävät EU:n sille asettamat kasvihuonekaasujen päästövähennystavoitteet. Uusimmat päästöinventaarit ja laskelmat viittaavat siihen, että päästökaupan ulkopuolisen sektorin (kuten talokohtainen lämmitys, liikenne ja jätehuolto) päästövähennystavoitteet saattavat täytyä jo päätettyjen kansallisten toimien avulla. Metsänielutaseen suotuista kehitys sekä Suomen toteuttama Kioton mekanismien osto-ohjelma varmistavat osaltaan, että Suomi pystyy täyttämään päästövähennystavoitteensa vaikka päästökaupan ulkopuoliseen sektoriin sisältyisikin epävarmuuksia.

Uusiutuvan energian osalta jo päätetyillä toimenpiteillä ollaan Suomessa saavuttamassa tavoite 38% energian loppukulutuksesta. EU:n uusiutuvan energian velvoite tieliikenteen polttoaineille on 10%, mutta Suomi on kansallisesti asettanut korkeamman 20% tavoitteen. Tavoite on varmistettu lainsäädännöllä. Polttonesteiden myyjille on annettu biopolttoaineiden jakeluvelvoite, joka pakottaa täyttämään vuositasolla uusiutuvan energian velvoitteet. Energiatehokkuuden parantamisen osalta ilmasto- ja energiastategiassa on asetettu energiasäästön (loppukulutuksesta laskettuna) tavoitteeksi 37 TWh vuoteen 2020 mennessä. Tästä tavoitteesta sähköenergian osuus on 5 TWh ja loppu on lämpöenergiaa sekä liikennepolttoaineita. Energian loppukulutus olisi tavoitteiden

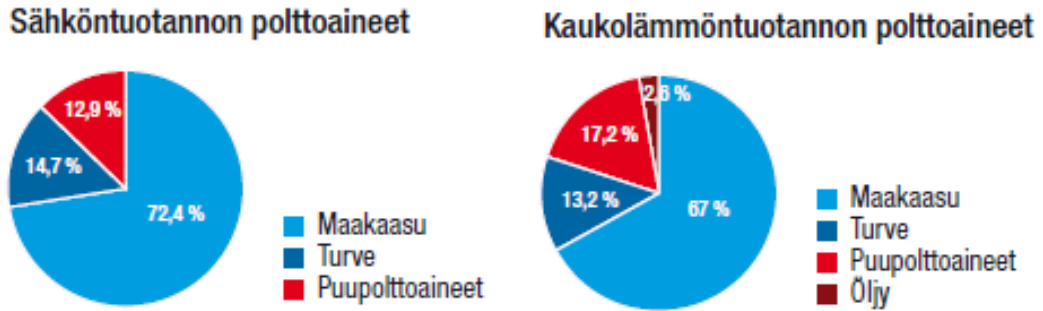
täytettyä 310 TWh vuonna 2020. Sähkön osalta tavoite tullaan saavuttamaan pääosin hidastuneen talouskasvun ja talouden rakennemuutoksen seurauksena. Muun energian osalta tavoitteeseen ei välttämättä päästä, jolloin loppukulutustavoitetta 310 TWh ei täysin saavuteta.

Energiatehokkuuden parantamisen ensisijaisena tavoitteena on luonnonvarojen säästäminen ja kasvihuonekaasujen kustannustehokas vähentäminen. Ilmastonsuojelun ohella energiasäästöllä parannetaan huoltovarmuutta, alennetaan energiakustannuksia sekä vähennetään energiatuotannossa syntyviä muita päästöjä. Suomi on energiakäytön tehokkuudessa ja monissa energiasäästötoimissa kansainvälisesti johtavia maita. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto sekä energiakatselmusten järjestelmällinen toteuttaminen ovat hyviä esimerkkejä tuloksellisesta energiasäästöstä. [2]

2.3 Uusiutuva energia Tampereella: poliittiset päätökset

Tampereen kaupunki pyrkii ilmastonmuutoksen torjunnan edelläkävijäksi. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi on keväällä 2010 aloitettu ECO₂ – Ekotehokas Tampere 2020 – energia- ja ilmastohanke. Hankkeen yhtenä tavoitteena on Tampereen kaupungin ilmastositoumusten toteuttaminen. Hanke muun muassa kokoaa ja koordinoi Tampereen kaupungin energia- ja ilmastopoliitiikan mukaisia toimenpiteitä. Tampereen kaupunki on ilmaissut sitoutumisensa ilmastonmuutokseen torjuntaan usein eri tavoin. Keskeisimpänä tavoitteena voidaan pitää Covenant of Mayorsissa sovittua yli 20 prosentin absoluuttista päästövähennystä vuoteen 2020 mennessä. [58]

Tampereen sähkölaitos on sitoutunut lisäämään uusiutuvan energian määrän tuotannossaan 30 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. Tällä toimenpiteellä on mahdollista saavuttaa huomattava osa Tampereen 20 prosentin päästövähennystavoitteesta. Uusiutuvan energian osuus sähkölaitoksen energiantuotannossa on noussut vuoden 2008 noin 3 prosentista vuoden 2012 noin 17 prosenttiin. Uusiutuvan energian osuus tulee kasvamaan entisestään, kun Tarastenjärven hyötyvoimalaitos valmistuu vuonna 2015. Hyötyvoimalaitos mahdollistaa Tampereen sähkölaitoksen oman energiatuotannon lähes 25 prosentin uusiutuvan energian osuuden saavuttamisen vuonna 2016. [58, 59]



Kuva 2. Tampereen sähkölaitoksen energiantuotannon polttoainejakaumat vuonna 2012. [59]

2.4 Uusiutuvan energian tukeminen: syöttötariffit ja investointituet

Uusiutuvia energiamuotoja tuetaan eri keinoin. Näin pyritään varmistamaan, että Suomen tavoite tuottaa 38% energiasta uusiutuvilla energialähteillä vuoteen 2020 mennessä saavutetaan. Suomen sähkön tuotannon tukimallit perustuvat investointitukiin ja tuotantotukiin eli niin sanottuihin syöttötariffeihin. Investointi- ja tuotantotukia valvovat työ- ja elinkeinoministeriö sekä maa- ja metsätalousministeriö. Syöttötariffin tarkoituksena on lisätä uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantokapasiteettia ja parantaa metsähakkeen kilpailukykyä vaihtoehtoisiin polttoaineisiin verrattuna. Päästökauppajärjestelmän tavoitteena on puolestaan heikentää fossiilisten polttoaineiden kilpailukykyä. [4]

2.4.1 Syöttötariffi

Vuonna 2011 voimaan astunut laki 1396/2010 uusiutuvilla energialähteillä tuotetun energian tuotantotuesta mahdollistaa tuulivoimaa, metsähaketta, biokaasua, sekä puupolttoainetta käyttäville sähköntuottajille syöttötariffituen tuotetusta sähköenergiasta. Syöttötariffijärjestelmässä sähkön tuottajalle, jonka voimalaitos on hyväksytty järjestelmään, maksetaan sähkön tavoitehinnan ja kolmen kuukauden markkinahinnan erotuksen mukaista tukea enintään 12 vuoden ajan. Syöttötariffin tavoitehintaa on 83,50 €/MWh. Tuulivoimarakentamisen nopean kasvamisen takaamiseksi uusille tuulivoimaloille maksetaan korotettua tavoitehintaa (105,3 €/MWh) enintään kolmen vuoden ajan vuoden 2015 loppuun asti. Syöttötariffijärjestelmään kuuluvassa metsähakevoimalassa tuotetusta sähköstä maksetaan syöttötariffia siten, että metsähakkeen käyttö polttoaineena yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa säilyy kilpailukykyisenä. Kyseisen tuen tarkoitus on edistää turpeen korvaamista metsähakkeella. Metsähakevoimalassa tuote-

tusta sähköstä maksetaan päästöoikeuden hinnan mukaan muuttuvaa tuotantotukea enintään 18€/MWh. [4,5]

Syöttötariffin edellytyksenä on, että tuulivoimaloiden tulee olla laituskooltaan vähintään 500kW. Metsähakelaitosten, puupolttoainelaitosten sekä biokaasulaitosten tulee puolestaan olla vähintään 100kW. Puupolttolaitosten enimmäiskapasiteetiksi on puolestaan määritelty 8MW. Kapasiteettirajoitusten lisäksi laitoksilta vaaditaan vähintään 200MWh:n sähkön tuotanto vuodessa. Tariffijärjestelmää rajoittaa Suomessa myös voimalaitosten kokonaiskapasiteetti. Tariffijärjestelmään ei hyväksytty enää uusia laitoksia, kun laitosten kokonaiskapasiteetti saavuttaa tuulienergialla 2500MW ja biokaasuvoimaloilla 19MW rajan. Puupolttoainevoimaloita otetaan järjestelmään mukaan, kunnes generaattoreiden yhteisteho ylittää 150MW ja voimalaitoksia on yli 50.

Puupolttoainevoimalassa ja biokaasuvoimalassa tuotetusta sähköstä maksetaan syöttötariffin korotuksena vakiona pysyvää lämpöpreemiot, jos lämpöä tuotetaan hyötykäyttöön ja voimalan kokonaishyötysuhde on vaaditun mukainen. Biokaasulla ja puupolttoaineilla toimivat yhteistuotantolaitokset ovat oikeutettuja syöttötariffijärjestelmässä lämpöpreemioon, joka on biokaasulaitoksille 50€/MWh ja puupolttoainevoimalaitoksille 20€/MWh. [5, s.60]

2.4.2 Investointituet

Syöttötariffijärjestelmän ohella keskeinen uusiutuvan energian tukimuoto on investointituki. Investointitukea jaetaan uusiutuvan energian käyttöön liittyviin hankkeisiin. Työ- ja elinkeinoministeriö voi hankekohtaisen harkinnan perusteella myöntää tukea sellaisiin ilmasto- ja ympäristömyönteisiin investointi- ja selvityshankkeisiin, jotka edistävät muun muassa uusiutuvan energian tuotantoa tai käyttöä. Uusiutuvan energian käyttöön liittyvät tuettavat investoinnit ja ohjeelliset tukiprosentit vuodelle 2013 ovat:

- Sähköntuotanto

Kaatopaikkakaasuhankkeet	15-20%
Aurinkosähköhankkeet	30%
- Lämmöntuotanto

lämpökeskukset (biomassa)	10-15%
lämpöpumppuhankkeet	20%
aurinkolämpöhankkeet	20%
biokaasuhankkeet	20-30%
- Polttoaineen tuotanto

biokaasuhankkeet (liikenne)	20-30%
muut biopolttoaineet	20-30%

- (1) tuulivoiman ja biokaasun osalta tuetaan vain hankkeita, joita ei ole hyväksytty syöttötariffijärjestelmään [5]

3 ESIMERKKEJÄ UUSIUTUVAN ENERGIAN HYÖDYNTÄMISESTÄ

3.1 Porvoo Skaftkärr

Skaftkärr hankkeessa tavoitteena on rakentaa Porvooseen uusi energiatehokas 400 hehtaarin suuruinen ja vähintään 6000 asukkaan asuinalue. Skaftkärrin alue sijaitsee Porvoon keskustan itäpuolella 1970-80 –luvulla rakennetun Kevätkummun vieressä. Skaftkärrin pilottihanke on osa Sitran viisivuotista energiaohjelmaa, jonka tavoitteena on ollut kääntää yhdyskuntien energiankäyttö ja kasvihuonekaasupäästöt laskuun. Hankkeen tärkeimpiä tavoitteita on luoda valtakunnallisesti hyödynnettävissä oleva konsepti, jonka avulla voidaan jatkossa rakentaa mahdollisimman energiatehokkaita asuinalueita. Hankkeessa pyritään:

- kaavoitusprosessin kehittämiseen energiatehokkuus paremmin huomioivaksi
- kunnallisen energiayhtiön liiketoimintamallien kehittämiseen
- LivingLab-toiminnan kehittämiseen

Kaavoitus on yksi tärkeimmistä työvälineistä yhdyskuntien kehittämisessä ja suunnittelussa. Energiatehokkuus on otettu Skaftkärrin alueella huomioon kaavoitusprosessin kaikissa vaiheissa. Alueen kaavarunkoa laadittaessa selvitettiin eri vaihtoehtoja tarkastelemalla alueen liikennejärjestelyjä, energiaratkaisuja ja rakennusten energiatehokkuutta. Kaavan lähtökohtina on ollut ajatus joukkoliikenteen ja houkuttelevan pyöräily- ja jalankulkuympäristön suunnittelemisesta. Tulevaisuuden energiatehokas rakentaminen luo haasteita myös energiayhtiöille. Lämmönkulutuksen pienentyessä muuttuu lämmön ja sähkön kulutuksen suhde merkittävästi rakennuksissa. Sähkönkulutuksen noustessa merkittävään rooliin rakennusten energijakaumasta ja ympäristöarvojen noustessa yhä tärkeämmiksi kriteereiksi, saattaa pienimuotoiseen sähköntuotantoon olla järkevää panostaa enemmän kuin tähän asti on tehty. Skaftkärrissä tavoitteena on ollut uusien innovatiivisten, puhtaiden ja taloudellisesti kilpailukykyisten lämmön ja sähkön tuotantoratkaisujen, kuten aurinkoenergian, edistäminen. Myös perinteisiä lämmitysmuotoja on kehitetty niin, että ne vastaavat energiatehokkaan rakentamisen asettamia uusia vaatimuksia. Hankkeen Living Lab-osassa pyritään energiatehokkuuden jatkuvaan parantamiseen. Living Labissa tarkoituksena on luoda puitteet vuorovaikutukselle, kehitystyölle ja sähkön kulutuksen vähentämiselle älykkäällä ja helppokäyttöisellä ohjausjärjestelmällä. Living Labiin osallistuviin talouksiin asennetaan sähkön päämittaus, joka mahdollistaa talossa kulutetun sähkötehon seuraamisen reaaliajassa internetin välityk-

sellä. Järjestelmän avulla pyritään kehittämään kohdistettua energianeuvontaa sekä edesauttamaan asukkaiden järkevää energiakäyttöä. [7]

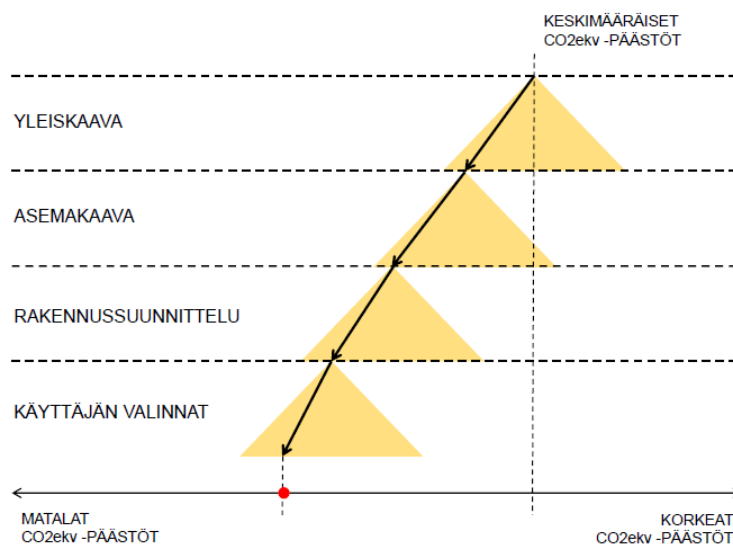


Kuva 3. Skaftkärrin asuinalueen sijainti kaupunkirakenteessa. [6]

Skaftkärrin alueen rakentamistyöt on aloitettu ja alueelle tullaan rakentamaan aluksi pääosin matalaenergiatasoisia pientaloja. Myös kerros- ja rivitaloja, palvelurakennuksia sekä viheralueita tullaan alueelle rakentamaan. Passiivienergiataloihin tullaan todennäköisesti siirtymään vaiheittain. Skaftkärrin Omenatarhan alueen omakotitalotonttien tarjouskilpailussa on ensimmäistä kertaa Suomessa otettu energiatehokkuus huomioon tonttien luovutukseen liittyvässä pisteytyksessä. Lisäksi Skaftkärr -hankeryhmä järjestää asukasiloja, joissa annetaan neuvontaa ja opastusta energiatehokkuudesta jo ennen kuin tuleva asukas hakee rakennuslupaa (tai tekee tarjousta tontista). Näin pyritään jo ennalta takaamaan energiatehokas rakentaminen. Omenatarhan alueelle tullaan rakentamaan myös koetalo, jossa porvoollaiset yritykset voivat toteuttaa uudenlaisia järjestelmiä, tuotteita ja palvelukonsepteja. Koetalo tulee myös toimimaan hankkeeseen osallistuvien yritysten esittely- ja referenssikohteena. [8, s. 32] Skaftkärrin ensimmäiset asuinalueet on kaavoitettu kaukolämmön piiriin, mikä on alueen hiilijalanjäljen kannalta suotuisaa. Porvoon kaukolämmöstä tuotetaan vuositasolla noin 70% uusiutuvalla energialla ja jatkossa biopolttoaineiden osuus tulee vielä kasvamaan. [7] Skaftkärriin on myös kaavailtu merkittävää aurinkolämpövoimalaa, jolla pystyttäisiin tulevaisuudessa kattamaan koko

asuinalueen vuotuinen lämmöntarve päästöttömästi. Voimalan aurinkokeräinten pinta-alaksi on kaavailtu $10\,000\text{ m}^2$, jolloin voimalalla saataisiin tuotettua noin 3000 MWh kaukolämpöä vuodessa. Voimalan maksimiteho olisi noin 6 MW, mutta erillisen lämpöakun avulla kaukolämmön tuotanto pystytään tasaamaan vuorokauden sisällä siten, että voimalan teho on enintään noin 2 MW tasaisesti ympäri vuorokauden. [11]

Skaftkärrin alueelle tehtyjen esiselvitysten perusteella tiedetään, että maankäytöllä ja kaavoituksella voidaan vaikuttaa huomattavasti alueen energiatehokkuuteen ja muodostuviin kasvihuonekaasupäästöihin. Selvityksen keskeisiksi tekijöiksi nousivat liikenteen energiankulutus, rakennusten energiatehokkuus, energian tuotantotavat, hiilijalanjälki ja mahdollisten toteutusvaihtoehtojen kustannustehokkuus. Selvitysten ja tavoitteiden pohjalta Skaftkärrin kaavarungossa on tehty valintoja, joilla alueen hiilidioksidipäästöt vähenevät 30% ja primaarienergian kulutus 38% alueelle alun perin vuonna 2007 laadittuun kaavarunkoon verrattuna. Kaavajärjestelmä ja siihen liittyvät välineet luovat monipuolisia mahdollisuuksia vaikuttaa joko suoraan tai epäsuorasti alueiden energiatehokkuuteen ja päästöihin. Yleispiirissä kaavoituksessa vaikutetaan oleellisesti muun muassa liikkumistarpeeseen ja sitä kautta liikenteen energiankulutukseen ja päästöihin. Osayleiskaavoituksessa ja asemakaavoituksessa ohjataan alueiden sisäisiä maankäyttöratkaisuja ja rakentamista. Kaavaprosessia kehitettäessä tulisi kuitenkin korostaa energiatehokkuutta. Energiatehokkuus ja hiilitaselaskelmat olisi hyvä liittää osaksi kaavoitusprosessia ja kaavan vaikutusten arviointia. Tietoisuus erilaisista keinoista ja tavoista, joilla voidaan vaikuttaa energiakulutukseen ja päästöihin, antaa mahdollisuuden konkreettisiin valintoihin suunnittelussa. Lisäksi kun kaavaprosessissa tuodaan näkyviksi eri ratkaisujen energia- ja päästövaikutukset, myös asukkailla ja kunnan luottamushenkilöillä on mahdollisuus arvioida suunnitteluratkaisujen ilmastovaikutuksia. [9, s. 25]



Kuva 4. Kaavoitusjärjestelmän kautta tapahtuvan ohjauksen vaikutus hiilidioksidipäästöihin ideaalitalanteessa. [10, muokattu]

3.2 Helsinki Östersundom

Östersundom, Itäsalmi, sijaitsee itäisen Helsingin ja läntisen Sipoon kuntien alueella. Östersundomiin on suunnitteilla usean kymmenen tuhannen asukkaan vihreän energian puutarhakaupunginosa, joka kulkisi kestävästä kehityksen kärjessä. Helsingin kaupunki, Helsingin Energia, ympäristöministeriö sekä joukko energia-alan yrityksiä ja rakennuttajia ovat yhdessä ideoineet Östersundomin uuden kaupunginosan toteuttamisen tavoitteista, haasteista ja mahdollisuuksista loppuvuonna 2012. Alkuvuodesta 2013 on julkaistu Östersundomin työryhmän, Östersundom-klinikan, tulosraportti, jossa on esitelty muun muassa Östersundomin energiavisio vuodelle 2020. [12]

Alueen rakennuksissa on suunniteltu hyödynnettävän pelkästään uusiutuvaa energiaa. Östersundom olisi nettonollaenergia-alue eli siellä tuotettaisiin uusiutuvaa energiaa vastaava määrä kuin alueen rakennuksissa kulutettaisiin. Alue tulisi olemaan hyvin pitkälti energiaomavarainen. Energiavision mukaan alueen rakennusten lämmitysenergian tarve olisi vähäinen ja pääosa lämmitysenergiatarpeesta kohdistuisi kotitalouksien käyttöveden lämmitykseen. Kiinteistöjen valaistu ja muu sähkö- ja talotekniikka olisi erittäin energiatehokasta ja niitä halittaisiin tilanteen ja käyttäjien tarpeiden mukaan reaaliaikaisesti. Alueella hyödynnettäisiin myös itsenäisesti aurinkosähköllä toimivia valaisimia ja muita laitteita. Liikkuminen alueella tapahtuisi jalan, polkupyörillä ja sähköavusteisilla liikkumisvälineillä, kuten sähköautoilla ja sähkökäyttöisillä joukkoliikennevälineillä. Sähkökäyttöisten liikkumisvälineiden akkujen lataaminen tapahtuisi niin ikään aurinkosähköllä. [12]



Kuva 5. Östersundomin aurinkovoimalan havainnekuva. [13]

Aurinkoenergia on osa energiakysymystä, joka liittyy kestävästä kehityksen mukaiseen kaupunkisuunnitteluun. Aurinkosähkön ohella alueelle on suunniteltu aurinkolämmön hyödyntämistä aurinkokeräimillä. Lämmön ja kylmän tuotannossa hyödynnettäisiin lisäksi maaperän ja vesistöjen lämpövarausta sekä biopolttoaineita. [12] Aurin-

koenergian osalta Östersundomin on tarkoitus toimia eräänlaisena testialustana suuren alueen puitteissa. Alueella tapahtuvan aurinkoenergian tutkimuskohteita olisivat erityisesti aurinkoenergian tuotanto ja varastointi yöksi ja talveksi sekä aurinkoenergian käyttö kiinteistöissä, julkisissa tiloissa ja laitteissa. Suunnitellun aurinkovoimalan paneelien pinta-ala on 40,2 ha ja voimalalle on varattu 43,6 ha pinta-alaa. Suunnitellun voimalan nimellisteho on 27 MW ja energian vuosituotto 22 GWh tämän päivän vakiomuotoisilla, piipohjaisilla aurinkopaneeleilla. [13]

4 AURINKOENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN

4.1 Aurinkosähkö

Auringon säteilyenergiaa on mahdollista muuttaa sähköenergiaksi aurinkopaneelin avulla, joka koostuu aurinkokennosta, lasilevystä ja alumiinikehyksestä. Kun aurinkokennoja kytketään tarpeellinen määrä sarjaan ja rinnan aurinkopaneelissa, saadaan muodostettua tarvittava jännite ja virta. Kun aurinkopaneeli sitten yhdistetään virtajohtimilla ulkoiseen kuormaan (esimerkiksi akkuun), muodostuu virtapiiri, jossa sähkö kulkee. Kytkeällä aurinkopaneeleita sarjaan ja rinnan saadaan sovelluskohteesta riippuen haluttu ulostuloteho. Yksittäisen aurinkopaneelin ulostuloteho on tyypillisesti muutamia satoja watteja. Samaa peruskomponenttia, aurinkopaneelia, käyttämällä on mahdollista rakentaa niin pienehkö, kymmenien wattien huvilajärjestelmä kuin usean megawatin aurinkosähkövoimalakin. Modulaarisuus on yksi aurinkosähkön tärkeimmistä eduista. Kaupalliset aurinkopaneelit pohjautuvat joko pii- tai ohutkalvokennoihin. Piikennojen raaka-aineena käytetään nykyään kiteistä tai monikiteistä piitä. Amorfista piitä voidaan puolestaan käyttää ohutkalvokennojen valmistukseen. Yksikiteinen pii on hyötysuhteeltaan monikiteistä piitä parempi, mutta toisaalta yksikiteinen pii on kalliimpi, koska sen valmistaminen on hidasta ja valmistusprosessissa on paljon energiaa vaativa kiteyttämisprosessi, mikä nostaa valmistuskustannuksia. Aurinkokennon hyötysuhde kertoo prosenteissa, kuinka suuri osuus auringon säteilyenergiasta voidaan muuttaa sähköksi. Kaupallisten kiteisestä piistä valmistettujen aurinkopaneelien hyötysuhde on luokkaa 10-14 %. Paneelin hyötysuhteen lisäksi aurinkosähköjärjestelmän kokonaishyötysuhteeseen vaikuttava muiden osien, johdotuksen ja tehoelektroniikan, hyötysuhteet. [30]

Aurinkosähköjärjestelmiin kuuluu aurinkopaneelin/paneelien lisäksi säätöjärjestelmä, invertteri sekä myös akusto, jonka avulla päivällä tuotettua energiaa on mahdollista varastoida myös pimeän ajan tarpeeseen. Aurinkosähköjärjestelmä voi olla omavarainen tai sähköverkkoon kytketty. Verkkoon kytketyt sovellukset ovat yleistyneet voimakkaasti viime vuosina. Tyypillisiä verkkoon kytkettyjä sovelluskohteita ovat pienjärjestelmät (kuten rakennuksiin asennetut laitteistot) ja sähkölaitosluokan aurinkovoimalat. Verkkoon kytketty laitos syöttää oman kulutuksen ylittävän osan tuotannostaan vaihtosuuntaajan kautta yleiseen sähköverkkoon. Aurinkosähkön etuja perinteisiin energiantuotantojärjestelmiin nähden ovat:

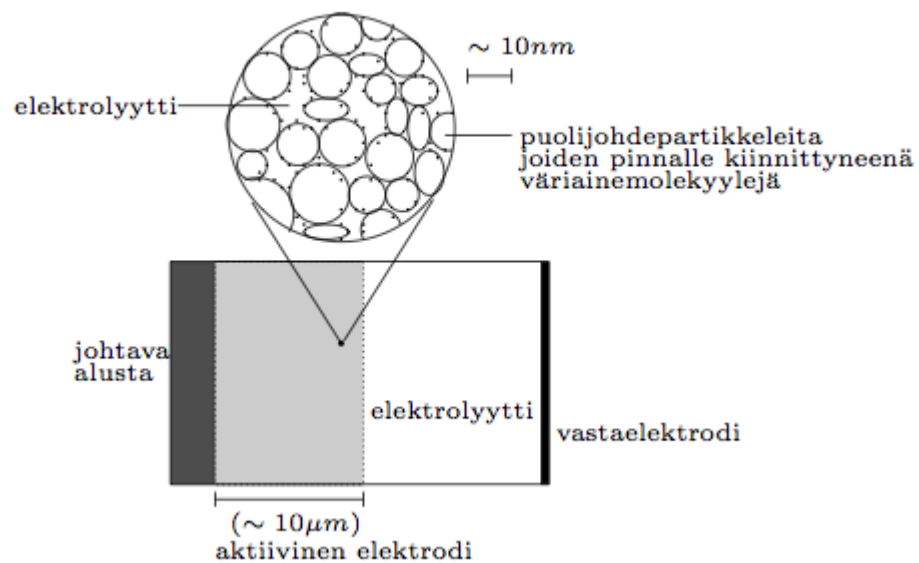
- Ei polttoaineen kulutusta
- Modulaarisuus: järjestelmät ovat helposti laajennettavissa
- Luotettavuus ja vähäinen huollon tarve
- Yksinkertaisuus ja asennuksen nopeus

- Pitkäikäisyys ja ympäristöystävällisyys. [30]

4.1.1 Nykyiset teknologiat ja tulevaisuuden näkymät

Aurinkokennotyypit jaetaan yleisesti kolmeen sukupolveen. Ensimmäisen sukupolven kennot ovat perinteisiä kiteisiä piikkennoja, joiden toimintaa tässäkin työssä tarkasteltiin tarkemmin. Niiden markkinaosuus on edelleen laskentatavasta riippuen 80-90 %. Kiteiset piikkennot ovat luotettavia ja laadultaan hyviä. Piikkennojen valmistaminen edellyttää puhdastiloja, joten isojen kennojen valmistaminen vaatii kalliita tiloja ja laitteita. Lisäksi piikkennojen valmistus kuluttaa paljon energiaa. Aurinkokennojen materiaali- ja valmistuskustannuksia on pyritty alentamaan toisen sukupolven kennoihin lukeutuissa ohutkalvokennoissa. Ohutkalvokennojen valmistus kuluttaa huomattavasti vähemmän puolijohdetta kuin kiteisten piikkennojen valmistus, sillä fotonien absorptioon vaadittava materiaalivahvuus on ohuempi, suoran energia-aukon ohutkalvokennoissa vain mikrometrin luokkaa. Ohutkalvokennojen hyötysuhde on muutaman prosenttiyksikön alhaisempi kuin kiteisten piikkennojen. Lisäksi ohutkalvokennot eivät ainakaan toistaiseksi ole onnistuneet valtaamaan markkinoita merkittävässä määrin. Ohutkalvokennojen toimintaperiaate on vastaava kuin kiteisten piikkennojen. Eli molempien toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön ja pn-liitoksen toimintaan. [28, s. 57]

Kolmannen sukupolven kennojen kehitystyö pohjautuu pitkälti nanoteknologiaan. Tutkituin nanoteknologiaan perustuva kennotyyppi on väriaurinkokenno, jonka toiminta muistuttaa luonnon fotosynteesiä. Sveitsiläinen Michael Grätzel voitti Millennium –palkinnon väriaurinkokennojen kehitystyöstä vuonna 2010. Vaikkakin väriaurinkokennot ovat vielä kehitysvaiheessa, ne ovat erittäin lupaava ja edullinen vaihtoehto piiaurinkokennoille. Väriaurinkokennot on mahdollista valmistaa edullisista materiaaleista eikä niiden tuotantoon vaadita monimutkaisia laitteita. Väriaurinkokennojen suurimpia haasteita ovat kennon hyötysuhde, kennon skaalaus suuremmaksi ja väriaineen stabiilius eli kestävyys, jolla tarkoitetaan kennon suorituskyvyn käyttäytymistä ajan kuluessa. Väriaineen kesto on tällä hetkellä luokkaa viisi vuotta kun tavoitteena on 20 vuotta. Väriaurinkokennoilla on toistaiseksi saavutettu laboratorio-olosuhteissa noin 11 % hyötysuhteita, mutta käytännön tilanteissa hyötysuhde jää kuitenkin vielä selkeästi 10 %:n alapuolelle, 5-6 % tietämille. Hyötysuhdetta on toki mahdollista nostaa paremmilla ja kalliimmilla ratkaisuilla, mutta massatuotantoa ajatellen on tarkoituksenmukaista löytää kompromissi hyötysuhteen, eliniän, valmistustekniikan ja materiaalien suhteen. Mikäli ennusteet alhaisista tuotantokustannuksista toteutuva massatuotannon myötä, väriaurinkokennojen tehokkuus-hinta-suhde tulee olemaan erittäin kilpailukykyinen ensimmäisen ja toisen sukupolven kennoihin verrattuna. [28, 29]



Kuva 6. Väriaurinkokennon rakenne. [28]

Väriaurinkokennojen toimintaperiaate poikkeaa merkittävästi ensimmäisen ja toisen sukupolven kennoista, sillä ne eivät sisällä ollenkaan pn-liitosta ja niiden toiminta edellyttää tiettyjen kemiallisten reaktioiden tapahtumista.. Väriaurinkokennon rakenteesta on erotettavissa neljä osaa: johtava alusta, aktiivinen elektrodi, elektrolyytti ja vastaelektrodi. Väriaurinkokenno nimitys johtuu väriainemolekyyleistä, jotka ovat kiinnittyneinä puolijohdepartikkelien pintaan aktiivisessa elektrodissa. Nanoteknologian tuoma hyöty puolestaan seuraa puolijohdepartikkeliverkoston valtavasta pinta-alasta. Koska väriaurinkokennossa tapahtuu kemiallisia reaktioita, on kennossa oltava elektrolyytti, joka kykenee luovuttamaan ja vastaanottamaan elektroneja sekä kuljettamaan varausta paikasta toiseen. Väriaurinkokennon elektrodien tehtävänä puolestaan on siirtää varausta kennon ja ulkoisen piirin välillä. Elektrodeista johtava alusta on toiminnaltaan yksinkertaisempi, sillä sen ainoastaan muodostaa sähköisen kytkennän aktiivisen elektrodin ja ulkoisen piirin välille. Vastaelektrodin tehtävänä on siirtää ulkoiselta piiriltä tulevat elektronit elektrolyyttiin, mikä edellyttää kemiallisten reaktioiden tapahtumista vastaelektrodilla.

Väriaurinkokennon toiminta alkaa fotonien absorptiosta puolijohdepartikkelien kiinnittyneissä väriainemolekyyleissä. Virittymisen seurauksena elektroni irtoaa väriainemolekyylistä, minkä seurauksen varaukseltaan alun perin neutraalista molekyylistä tulee positiivisesti varautunut ioni. Mikäli irronneen elektronin energia on riittävä se siirtyy puolijohteen johtavuusvyölle, jolloin se on vapaa liikkumaan puolijohteessa. Mikäli kaikki menee hyvin elektroni löytää tiensä puolijohdepartikkeliverkostoa pitkin johtavalle alustalle ja sieltä edelleen ulkoisen piirin kautta vastaelektrodille. Vastaelektrodilta elektroni siirtyy kemiallisen reaktion kautta elektrolyyttiin, jossa se osallistuu väriainemolekyylin palauttamiseen alkuperäiseen tilaansa (elektrolyyttiltä vaaditaan siis

kykyä toimia sekä hapettimena että pelkistimenä). Tällöin positiivisesti varautunut väriaine-ioni pelkistyy takaisin väriainemolekyyliksi ja kierto alkaa uudelleen. [28]

4.1.2 Aurinkosähköenergian varastointi

Aurinkosähköenergian tuotanto vaihtelee sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä epäsäännöllisesti. Tuotettu aurinkosähkö on mahdollista siirtää jakeluverkkoon suoraan, jolloin energiavarastoinnin tarvetta ei välttämättä ole. Keskitetyt aurinkosähköjärjestelmät on perinteisesti liitetty suoraan jakeluverkkoon, mutta suuret järjestelmät saattavat tarvita energianvarastointia verkon toiminnan varmistamiseksi, kuten sähkön taajuuden liian suurien vaihteluiden välttämiseksi. Ilman jakeluverkkoliitää toimivissa omavaraisissa aurinkosähköjärjestelmissä, kuten kesämökeillä, energian varastointi on selkeästi edellytyksenä aurinkoenergian käytölle. Omavaraisessa järjestelmässä energian varastoinnin vaatimuksena on vähintään päivästä yöhön tapahtuva tuotannon ja kulutuksen erojen tasaaminen. Toisaalta aurinkosähkön varastointi tasaa aurinkosähköjärjestelmän jännitevaihteluita, mahdollistaa suuret hetkelliset huipputehot ja luo mahdollisuuden myydä aurinkosähköä verkkoon, sähkön hinnan mukaan optimoiden. [32]

Teknis-taloudellisesti järkevä varastointitekniikka riippuu muun muassa aurinkosähköjärjestelmän koosta, hyödyntämistavoitteista, sijoituspaikasta ja huoltotarpeesta. Sähköenergian varastointityyppejä on useita, kuten superkondensaattorit, suprajohtavat magneettiset energiavarastot, vauhtipyörät, akut, paineilma- ja pumpatut veden varastot. [32] Näistä varastointimuodoista käytetään vielä nykyään lähes poikkeuksetta perinteistä akkutekniikkaa, joten paneudutaan seuraavaksi niihin hieman tarkemmin. Lisäksi taulukosta 3 selviää, että kustannustehokkaat ja teknillisesti mahdolliset energian varastointitekniikat megawatti-kokoluokassa perustuvat pääosin akkutekniikkaan.

Akku on sähkökemiallinen energiavarasto, jonka tehokas käyttö rajoittuu lähinnä päivä- ja viikkotason energiavarastointiin. Kesästä talveen ulottuvaan kausivarastointiin nykytekniikka ei juuri tarjoa käytännön mahdollisuuksia. Akkuja kytkevä sarjaan ja rinnan akustoksi saadaan haluttu varastointikapasiteetti. Aurinkosähköjärjestelmä edellyttää akustolta hyvää lataushyötysuhdetta, matalaa itsepurkautumista, vähäistä huoltotarvetta sekä hyviä sylkiominaisuuksia (toiminta tilanteessa, jossa akkua vuoroin puretaan ja ladataan). Akun valinnan tulisi perustua kokonaistaloudellisuuteen, jossa otetaan huomioon akun hankintahinta, hyödynnettävissä oleva kapasiteetti, huollontarve, lataushyötysuhde ja akun odotettava elinikä. [30] Uusien akkuteknologioiden kehitystyö keskittyy energiatihedyyden, tehokkuuden ja eliniän lisäykseen sovelluksen tämänhetkessä toimintaympäristössä.

Lyijyakut edustavat perinteistä ja myös edullista akkuteknologiaa. Lyijyakun rakenteessa on lyijyoksidi (PbO_2) –katodi, lyijy (Pb) –anodi ja rikkihappo (H_2SO_4) elektrolyyttiliuos. Lyijyakun ongelmana voidaan pitää sen nopeaa itsepurkautumista ja pientä energiatihedyyttä ($<100 \text{ Wh/kg}$), joka johtuu lyijyn suuresta tiheydestä. Lisäksi lyijyaku on ympäristölle haitallinen ja sen elinikä on lyhyt. Lyijyakun hyötysuhde on

80-90%, elinikä 3-12 vuotta ja sykli-ikä 50-2000 sykliä. Natrium-rikkiakku muodostuu positiivisesta elektrodista, joka on sulaa rikkiä (S) ja negatiivisesta elektrodista, joka on nestemäistä natriumia (Na) sekä keraamisesta elektrolyytistä. Natriumakuilla on monia muita kemiallisia akkuja parempi energiatiheys, korkea hyötysuhde (89-92 %), pitkä elinikä ja materiaalit ovat halpoja. Litiumioniakkujen etuja muihin kehittyneisiin akkuihin nähden ovat niinkään korkea energiatiheys ja hyötysuhde (lähes 100 %) sekä pitkä ikä (3000 lataus-purkauskertaa 80 % kapasiteetilla). Litiumakkuja on perinteisesti käytetty kannettavissa sovelluksissa. Suuremman kokoluokan sovelluksissa ongelmana on ollut korkea hinta. Litium-ioniakut vaativat aina latauksen valvonnan ja akkukohtaisen virran, lämpötilan ja jännitteen valvonnan, koska esimerkiksi sallitun jännitealueen alittaminen tai ylittäminen vanhentaa akkua nopeasti ja voi mahdollisesti aiheuttaa räjähdysvaaran. [33]

Taulukko 3. Energiavarastojen kustannuksia vuonna 2008. [33]

Teknologia	Energiavaraston hankintakustannukset €/kWh *)	Liitännän teho-elektroniikan kustannukset €/kW *)	Asennuksen ja liitännän oheiskustannukset €/kW *)	Järjestelmäkoko soveltuvuus
Lyijyakut	94	110	31	pieni
Suljetut lyijyakut	125	110	31	pieni, keskisuuri
ZnBr akut	251	110	0	
NaS akut	157	94	0	pieni (vain ZEBRA), keskisuuri, suuri
Litium-ioniakut	314	110	19	pieni, keskisuuri, suuri
Vanadium-redox	220	110	31	keskisuuri
CAES säiliömalli	75	345	31	keskisuuri, suuri
Nopeat vauhtipyörät	627	188	0	nopeat lyhytaikaiset: pieni, keskisuuri
Hitaat vauhtipyörät	238	176	0	nopeat lyhytaikaiset: pieni, keskisuuri
Polttokenno	10	940	0	kaiken kokoiset
Elektrolyysi polttokennon lisänä	0	190	0	kaiken kokoiset

*) muunnettu \$→€ vuoden 2008 vaihtokurssin mukaan.

Taulukko 4. Energiavarastotyyppien soveltuvuus aurinkoenergiajärjestelmiin. [33]

Teknologia	Etu	Haitta	Soveltuvuus aurinkoenergiajärjestelmiin		
			Pieni <100kW	Keski- suuret 100–500 kW	Suuret > 500 kW
Vauhtipyörät	Suuri teho lyhyen ajan	Pieni energia- tiheys	1)	1)	1)
Super- konden- saattorit	Suuri teho lyhyen ajan	Pieni energia- tiheys	1)	1)	1)
Lyijyakut	Edullisia	Lyhyt syklinen elinikä	Sopii hyvin (solar ja syväpurkaus- mallit)	Sopii hyvin (solar ja syväpurkaus- mallit)	Ei nykyään toteuteta
NaS ja NaNiCl (ZEBRA) akut	Suuri teho- ja energiatiheys	Korkea käyttölämpö- tila, vähän valmistajia	ZEBRA käy mutta ei yleinen	ZEBRA ei yleinen	NaS toteutuksia Japanissa
Litiumioniak- ut	Suuri teho- ja energiatiheys	Kustannukset, valvonta- järjestelmät	Sopii ja on toteutettu	Sopii ja on toteutettu	Sopii, kallis
ZnBr virtausakut	Teho ja energia eivät riipu toisistaan	Energiatiheys, vähän valmistajia	Ei	Mahdol- linen	Ei toteu- tuksia
Vanadium redox akut	Teho ja energia eivät riipu toisistaan	Energiatiheys, vähän valmistajia	Ei	Joitakin toteutuksia	Mahdol- linen
CAES	Pienet kustan- nukset, suuri energia	Vaatii sopivan sijoituspaikan	Ei	Voi olla mahdollinen kallis	Sopii paremmin >100 MW
Pumpatut vesivarastot	Pienet kustan- nukset, suuri energia	Vaatii sopivan sijoituspaikan	Ei		Sopii paremmin >100 MW
Elektrolyysi + polttokennot	Sopii kaikkiin kokoluokkiin, joustava	Kallis, teknologia ei valmis	Sopii on toteutettu	Sopii	Mahdol- linen
1) soveltuu varastoimaan ja tuottamaan lyhyen tehopiikin yleensä esim. akkujen lisänä					

4.1.3 Aurinkosähkön tuotantopotentiaali

Auringon ympäristöönsä säteilemä teho määräytyy lähes pelkästään auringon pintalämpötilan perusteella, joka on noin 5800 K. Tämä pintalämpötila määrittää hyvin tarkasti sen intensiteetin (säteilyteho pinta-alayksikköä kohti), jolla aurinko säteilee energiaa avaruuteen. Auringon säteilyintensiteetin mallintaminen puolestaan onnistuu varsin luotettavasti mustan kappaleen säteilylain avulla. Maahan tuleva säteily on huomattavasti pienempi kuin auringon pinnalla, koska etäännyttäessä auringosta säteilyn intensiteetti luonnollisesti pienenee, sillä sama kokonaissäteily jakautuu nyt huomattavasti suurem-

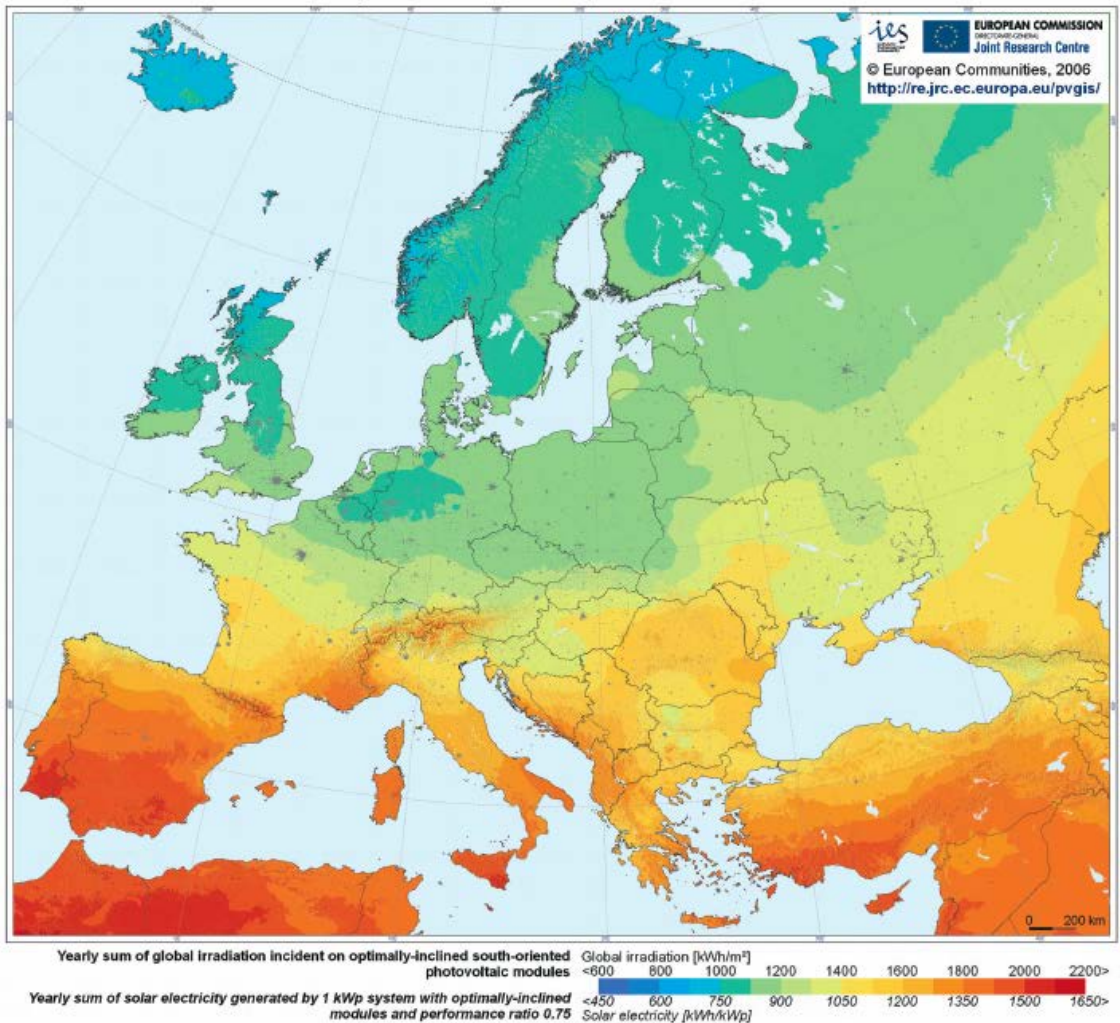
malle pinta-alalle. Maahan tuleva säteily saadaan selville auringon säteilytehosta auringon ja maan pinta-alojen suhteen perusteella:

$$g_m = \frac{A_a}{A_m} * g_a, \quad (1)$$

jossa g_a on auringon säteilyintensiteetti, A_a on auringon pinta-ala ja A_m on maan pinta-ala, jolle säteilyintensiteetti jakautuu maan etäisyydellä auringosta. Aurinkovakio S kuvastaa auringonsäteilyn kokonaistehoa pinta-alayksikköä kohti maan etäisyydellä auringosta. Aurinkovakion laskennallinen arvo on noin 1370 W/m^2 . Aurinkovakio on mahdollista laskea auringon säteilyintensiteetistä yksinkertaisesti pinta-alojen suhteena, koska avaruudessa, matkalla auringosta maahan, ei ole säteilyä vaimentavaa ainetta/varauksia. Maan pinnalla säteilyintensiteettilukemat jäävät huomattavasti aurinkovakiota pienemmiksi, koska maan ilmakehässä säteily kohtaa varauksia ja luovuttaa osan energiastaan niille. Käytännössä auringon säteily vaimenee ilmakehän vaikutuksesta siten, että kirkkaana kesäpäivänä päästään maan pinnalla parhaimmillaan noin 1000 W/m^2 intensiteettilukemiin. Lukema luonnollisesti riippuu maantieteellisestä sijainnista ja on suurimmillaan päiväntasaajalla. Suomen leveyspiirilläkin on mahdollista saavuttaa parhaimmillaan kesäpäivänä huomattavan korkeita intensiteettilukemia ($\sim 1000 \text{ W/m}^2$). [28]

Aurinkoenergian saatavuutta sekä aurinkosähkön tuotantopotentiaalia Kolmenkulman alueella voidaan arvioida PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) tietojärjestelmän avulla. PVGIS on karttapohjainen palvelu, jolla voidaan arvioida aurinkoenergian saatavuutta sekä aurinkosähkön tuotantopotentiaalia valosähköiseen ilmiöön perustuvilla järjestelmillä Euroopassa, Afrikassa ja Lounais-Aasiassa. PVGIS:n kaksi tietokantaa perustuu paikka- ja säteilymittauksien avulla muodostettuihin keskiarvollisiin säteilykarttoihin. Säteilykartoissa alueet on jaettu $1 \text{ km} * 1 \text{ km}$ ruutuihin, joille auringonsäteilyn määrä on laskettu lähimpien mittaustietojen, säätilastojen ja maaston ominaisuuksien perusteella. PVGIS ohjelman karttatietojen sekä ohjelmaan syötettävien paikka- ja aurinkokennotietojen perusteella ohjelma laskee tasolle tulevan keskimääräisen säteilyn määrän päivä-, kuukausi- ja vuositasolla. Tarkasteltavien tasojen (aurinkokennojen) suunta- ja kallistuskulman on mahdollista itse säätää tai halutessaan voi antaa ohjelman määrittää optimaaliset suunta- ja kallistuskulmat tarkasteltavassa kohdesijainnissa. Tuloksia arvioitaessa on hyvä huomioda, että ohjelma ei huomioi todellisia sääoloja, vaan esittää tilastollisia keskiarvoja. Lisäksi laskennassa kennomallit on oletettu ideaalisiksi. Kuvasta 7. voidaan huomata, että säteilyintensiteettilukemat Suomessa ovat hyvät aurinkosähkön hyödyntämiseen ja vuotuiset säteilymäärät nousevat Etelä-Suomessa hyvin lähelle Pohjois-Saksan lukemia. Saksa on perinteisesti ollut Euroopan johtavia aurinkosähkövaltioita. Etelä-Suomessa vuotuinen auringonsäteilyn määrä etelään suunnatulla optimaalisesti kallistetulla tasolla on noin 1000 kWh/m^2 , pienentyen pohjoiseen mentäessä, ollen esimerkiksi Jyväskylässä noin $950 \text{ kWh/m}^2/\text{vuosi}$ ja Lapis-
sa noin $850 \text{ kWh/m}^2/\text{vuosi}$.

Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



Kuva 7. Vuotuinen auringonsäteilyn määrä sekä aurinkosähkön tuotantopotentiaali etelään suunnatulle optimaalisesti kallistetulle pinnalle Euroopassa. [34]

Seuraavassa taulukossa on esitetty ohjelmalla saadut tulokset Kolmenkulman alueen aurinkosähkön tuotantopotentiaalista. Lähtöoletuksena on käytetty 1 MW- kokoluokan, monikiteisestä piistä valmistettu aurinkosähköjärjestelmä, jonka kennojen hyötysuhde on noin 14 %. Kennoille oletetaan kiinteä asennus maahan, etelään suunnattuna ja optimaalisella kallistuskulmalla, jonka ohjelma optimoi. Järjestelmän kokonaishyötysuhde sisältää kennon hyötysuhteen lisäksi muun muassa sähkökaapeleiden ja tehoelektroniikan häviöt. Optimaaliseksi kallistuskulmaksi Tampereen leveyspiirillä ohjelma antaa 42°. Aurinkosähkövoimalan energiantuotanto on hyvin olosuhderiippuvaista ja tuotanto vaihteleeikin voimakkaasti päivittäin ja kuukausittain vallitsevien sääolosuhteiden mukaan. Oheisessa taulukossa ja kuvaajassa on esitetty aurinkosähkön tuotantopotentiaali alueella edellä mainituilla tiedoilla. Taulukosta 5. voidaan havaita, että pääasiassa säteilyintensiteetin muutosten seurauksena nimellisteholtaan 1 MW:n aurinkosähkövoimalan päivittäinen tuotanto voi vuoden aikana vaihdella noin 282 kWh:n (Joulu-

kuu) ja 4160 kW:h (Toukokuu) välillä. Aurinkosähkövoimalan vuosituotannoksi saadaan noin 849 MWh.

Taulukko 5. Aurinkosähkön keskimääräinen tuotantopotentiaali Kolmen kulman alueella. [34]

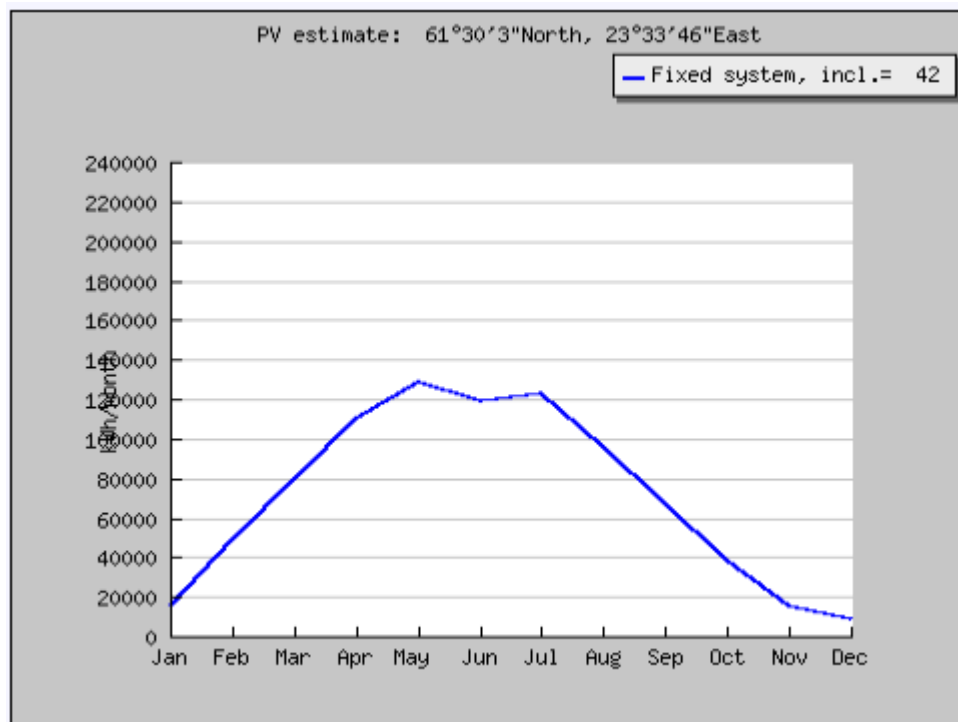
Fixed system: inclination=42°, orientation=0° (Optimum at given orientation)				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	504.00	15600	0.57	17.7
Feb	1750.00	48900	2.01	56.4
Mar	2560.00	79400	3.08	95.6
Apr	3680.00	110000	4.69	141
May	4160.00	129000	5.52	171
Jun	3960.00	119000	5.43	163
Jul	3950.00	122000	5.45	169
Aug	3080.00	95500	4.18	129
Sep	2230.00	67000	2.89	86.6
Oct	1230.00	38100	1.51	46.7
Nov	505.00	15200	0.59	17.7
Dec	282.00	8740	0.32	9.91
Yearly average	2330	70700	3.03	92.0
Total for year		849000		1100

E_d : Keskimääräinen päivittäinen sähkön tuotantopotentiaali (kWh)

E_m : Keskimääräinen kuukausittainen sähkön tuotantopotentiaali (kWh)

H_d : Keskimääräinen päivittäinen auringon säteilyenergia (kWh/m²)

H_m : Keskimääräinen kuukausittainen auringon säteilyenergia (kWh/m²)



Kuva 8. Aurinkosähkön keskimääräinen tuotantopotentiaali kuukaudessa Kolmenkulman alueella (kWh). [34]

Aurinkosähkön tuotantopotentiaalilaskelmissa tulee huomioida, että aurinkopaneelit ”kuluvat käytössä”. Tehosta on jäljellä 93 % 10 vuoden kuluttua ja 80 % 25 vuoden kuluttua. [35]

4.2 Aurinkolämpö

Aurinkolämpöä voidaan hyödyntää mm. höyryn tuotannossa sekä jäähdytyksessä, mutta perinteisesti sitä on hyödynnetty käyttöveden ja tilojen lämmityksessä. Tässä työssä on keskitytty tarkastelemaan keskitetyn aurinkolämmön hyödyntämistä kaukolämmön tuotannossa.

Aurinkolämmön hyödyntäminen on toistaiseksi vähäistä Suomessa, mutta kiinnostus aurinkolämmön hyödyntämiseen sekä kiinteistökohtaisissa että keskitetyissä ratkaisuissa kasvaa jatkuvasti. Euroopan aurinkolämmön tuotanto vuonna 2010 oli arviolta 15-20 TWh, josta Suomen arvioitu osuus oli alle 20 GWh. Suomessa ei ole toistaiseksi asennettu keskitettyjä ratkaisuja vaan olemassa olevat järjestelmät ovat kiinteistöihin asennettuja.

Aurinkolämmön yleistymistä on hidastanut muita lämmitysmuotoja suuremmat tuotantokustannukset sekä tarve korvaavalle lämmitysmuodolle talviaikaan. Viime vuosien teknologinen kehitys, tiukentuneet rakentamismääräykset ja vaateet energiatehokkuudesta, hiilineutraaliudesta ja uusiutuvien energialähteiden hyödyntämisestä sekä aurinkolämpöön liitettävät imagotekijät ovat lisänneet kiinnostusta aurinkolämpöä kohtaan. [52]

4.2.1 Keräinteknologiat

Auringonsäteily saadaan muutettua lämmöksi aurinkolämpökeräinten avulla. Aurinkolämpökeräimet jakautuvat keskittäviin ja ei-keskittäviin ratkaisuihin. Yleisimmät keräintyypit ovat ei-keskittäviin ratkaisuihin lukeutuvat tasokeräimet ja tyhjiöputkikeräimet. Erityisesti tasokeräimet ovat melko vakiintuneita, sillä niitä on käytetty jo pitkään muun muassa lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Aurinkoenergiatekniikan kokema lisääntynyt kiinnostus viime vuosina erityisesti Saksassa ja Skandinaviassa on johtanut kehittämään keräintyypppejä, jotka soveltuvat hyvin myös pohjoisen kylmiin olosuhteisiin. [21, s. 6]

Tasokeräimet ovat edullisimpia ei-keskittäviä keräinratkaisuja. Tasokeräin on lisäksi Euroopassa yleisempi, etenkin suurissa järjestelmissä. Tasokeräimissä auringonvalo sitoutuu eli absorboituu tasomaiseen levyyn, keräinpintaan. Keräinpinta on pinnoitettu absorptio-ominaisuuksien parantamiseksi selektiivisellä absorptiopinnoitteella, joka absorpoo tehokkaasti auringon säteilyä ja säteilee heikosti takaisin lämpösäteilyä (infra-punasäteilyä). Absorptiopinnoista lämpö johtuu lämmönsiirtonesteeseen. Vesi-

glykoliseos jäätyksen estämiseksi, on yleisin lämmönsiirtoaine. Yksinkertaisemmissa sovelluksissa käytetään myös ilmaa lämmönsiirtoaineena, mutta ilmalla lämmönsiirto-kyky on huomattavasti heikompi. Auringonsäteily saapuu absorptiopintaan, joka on suljettu lämpöeritettynä laatikkoon, yhden lasilla peitetyn seinämän kautta. Keräimen lämpöeritys sekä lasin ja absorptiopinnan optiset ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi keräimen lämpötekniisiin ominaisuuksiin. Kokonaisjärjestelmän hyötysuhteeseen puolestaan vaikuttavat merkittävästi myös lämmönsiirto-putkiston pituus ja sen lämmöneristyksen laatu. [21, s. 7]

Tyhjiöputkikeräin koostuu yksittäisistä riviin asennetuista tyhjiöputkista. Tyhjiöputkikeräimessä auringon valo absorboituu putken pinnalle. Lämmöneristeenä toimii kahden lasiputken väliin jäävä tyhjiö. Auringon valon absorboivan putki on suljettu suurempaan putkeen, josta ilma on poistettu. Näin kuuma putki saadaan eristettyä hyvin ympäristöstään. Eristyksen ansiosta tyhjiöputkikeräimillä on mahdollista saavuttaa korkeampia lämpötiloja kuin tasokeräimillä. Tyhjiöputkikeräimen tyypillinen toimintalämpötila on 70-120 °C ja tasokeräimen 30-70 °C. [52] Tyhjiöputken sisällä lämmönsiirtoaine on perinteisesti kiertänyt u-putkessa, mutta moderneissa ratkaisussa tyhjiöputken sisällä on eräänlainen lämpöputki, jonka sisällä oleva alkoholi tai vesi höyrystyy jo matalissa lämpötiloissa normaalia ilmanpainetta alhaisemman ilmanpaineen takia. Auringonsäteilyn lämmittäessä lämpöputkessa olevaa nestettä, se höyrystyy ja höyry kulkeutuu putken yläpäähän, missä höyry kondensoituu ja lämpö siirtyy edelleen lämmönvaihtimen välityksellä lämmönsiirtonesteeseen. Lämmönsiirtoneste ei siis kierrä tyhjiöputken sisällä lämpöputkiperiaatteella toimivassa tyhjiöputkikeräimessä. Tällainen niin sanottu kuivaliitos-ratkaisu helpottaa huomattavasti huoltotöitä erityisesti silloin, kun yksittäinen keräinputki rikkoutuu ja se joudutaan vaihtamaan. Tyhjiöputkikeräimistä on kehitetty myös hieman tasokeräintä muistuttava heijastimella varustettu koteloitu versio, joka soveltuu erityisesti kylmiin olosuhteisiin. Heijastin mahdollistaa putkien ohi menevän säteilyn hyödyntämisen, joten niillä on mahdollista saavuttaa hieman parempi kokonaishyötysuhde kuin avonaisilla tyhjiöputkikeräimillä. Lisäksi koteloidussa ratkaisussa tyhjiöputket suojattu paremmin mekaaniselta rasitukselta, mikä parantaa niiden kestävyyttä. [21, s. 9]

Keskittäviä lämpökeräimiä hyödyntävissä suurissa voimalaitoksissa tuotettavaa korkealämpötilaista lämpöä käytetään sähkön tuottamiseksi höyryturbiinitekniikoilla. Myös ORC-tekniikkaa sekä stirling-moottoreita on hyödynnetty joissakin tapauksissa. Keskittävien keräinten mekaaniset, liikkuvat rakenteet ovat erittäin vaativia Suomen kylmässä talvessa. Seurantajärjestelmistä on hyötyä lähinnä vain kesäaikana, sillä auringon säteily painottuu Suomessa voimakkaasti kesäkuukausille. Lisäksi Suomessa auringon suoran säteilyn osuus kokonaissäteilystä on pienehkö, joten keskittävien järjestelmien hyöty jää senkin vuoksi vähäisemmäksi. Epäsuoraa säteilyä puolestaan Suomessa on suhteellisen runsaasti saatavissa ja se pystytään hyödyntämään varsin hyvin tasojen tyhjiöputkikeräimillä. Käytännössä siis keskittävien keräinratkaisujen hyödyntäminen Suomessa ei ole kannattavaa ellei niiden ratkaisut tule erityisen edullisiksi ja kausivastointi saadaan toteutettua kustannustehokkaasti. [21, s. 11]

4.2.2 Keskitetty aurinkolämpöjärjestelmä

Keskitetyssä aurinkolämmön tuotannossa tuotetaan lähtökohtaisesti normaalin kaukolämmön lämpöistä vettä (70-80 °C) ja se voidaan rinnastaa muihin kaukolämmön tuotantoyksikköihin. Keskitetyissä aurinkolämpöratkaisuissa aurinkokeräimet on sijoitettu keskitetysti yhteen paikkaan, josta lämpö kytketään kaukolämpöverkkoon useimmiten lämpövaraston kautta. Aurinkolämmön yhteydessä lämpövarastona käytetään useimmiten lämpövaraajaa, jonka kapasiteetti riittää vähintään tasaamaan vuorokauden sisäisen ja usein myös muutaman päivän tuotantomäärän vaihtelun. Aurinkokeräinten ja kaukolämpöverkon välissä on lämmönsiirrin, koska keräinten lämpöpiirissä on pakkasta kestävä kiertoaaine ja painetaso on alhaisempi kuin kaukolämpöjärjestelmässä.

Aurinkolämpöjärjestelmä voidaan kytkeä sekä kaukolämmön meno- että paluulinjaan. Aurinkolämpökeräinten lämmöntuotannon kannalta menolinjan korkeampaan lämpötilatasoon kytkeminen on epäedullista, mutta toisaalta paluuveteen syötetyn lämmön arvo saattaa olla jopa 30-60% alhaisempi kuin menoveteen syötetyn lämmön, mikäli kaukolämmön tuotannossa on savukaasupesuri. Paluulinjaan kytketty aurinkolämpöjärjestelmä alentaa chp-laitoksen yhteydessä myös tuotetun sähkön määrää. Mikäli kaukolämpöverkossa ei ole savukaasupesuria eikä sähkön tuotantoa, on tuotetun lämmön arvo paluu- ja menolinjassa yhtä suuri. [52]

4.2.3 Aurinkolämmön tuotantopotentiaali

Suomessa aurinkolämpö soveltuu lämmöntuotantoon keväästä syksyyn ja toimii täten lisäenergianlähteenä muiden lämmitysjärjestelmien rinnalla. Aurinkolämpö ei siis voi yksinään korvata mitään lämmitysmuotoa. Etelä-Suomessa auringon vuotuinen säteilyenergia on noin 1000 kWh/m². Tästä energiamäärästä on mahdollista ottaa talteen aurinkokeräimillä hyötysuhteen verran eli noin 30-40 %, jolloin lämpöenergiaa saadaan keskimäärin 300-400 kWh/m² vuodessa. Tyhjiöputkikeräimillä lämpöä saadaan talteen korkeamman hyötysuhteen ansiosta noin 400-800 kWh/m² vuodessa. [51]

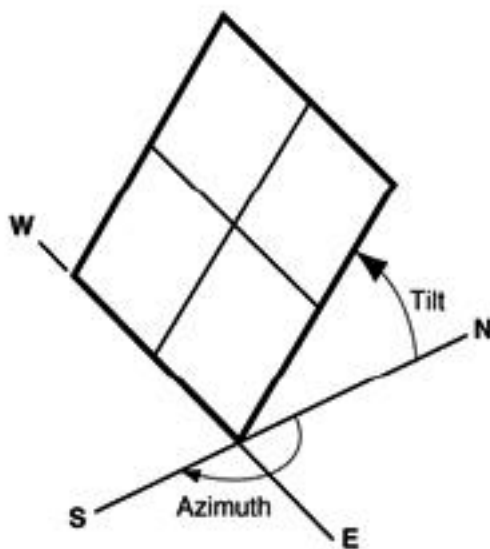
Konsultointi- ja suunnitteluyhtiö Pöyryn Työ- ja elinkeinoministeriölle sekä Energiategollisuus ry:lle tekemä selvitys (7.6.2013) Aurinkolämmön liiketoimintamahdollisuuksista kaukolämmön yhteydessä Suomessa. Selvityksen mukaan keskitetyn aurinkolämmön taloudellinen höyty on seurausta aurinkolämmön yhteydessä olevan kaukolämmön muuttuvien tuotantokustannusten laskusta. Aurinkolämmöllä ei ole vaikutusta olemassa olevan tuotantorakenteen kiinteisiin kustannuksiin, koska aurinkolämpö ei korvaa muuta kapasiteettia.

Keskitetyn aurinkolämpöjärjestelmän taloudellinen kannattavuus riippuu siitä, mitä polttoainetta aurinkolämpö korvaa kaukolämmön tuotannossa. Mikäli aurinkolämmöllä korvataan kiinteitä polttoaineita, kuten puuta, turvetta tai kivihiiltä, on kannattavuus heikko. Nykyisellä hintatasolla öljyn korvaaminen on jo kannattavaa, mutta öljyn käytön tulisi painottua kesäkaudelle. Maakaasun korvaaminen Suomessa on tällä hetkellä lähellä kannattavaa. Yhteenvetona voidaan todeta, että Suomessa aurinkolämmön

tuotantokustannukset ovat pääosin kaukolämmön muuttuvia tuotantokustannuksia korkeammat. Koska Aurinkolämmöllä ei ole Kolmenkulman alueella mahdollista korvata öljyn tai maakaasun käyttöä, niin voidaan todeta, että aurinkolämpö ei ole kannattava tarkasteluvaihtoehto keskitetyn kaukolämmön tuotantoon Kolmenkulman alueella. [52]

4.3 Keskitetty energiatuotantoratkaisu

Aurinkoenergiaa on mahdollista tuottaa hajautettujen kiinteistöihin integroitujen järjestelmien lisäksi suurissa keskitetyissä aurinkoenergiapuistoissa. Keskitetyn järjestelmän etuina voidaan pitää, että aurinkopaneelit ja -keräimet on usein mahdollista sijoittaa optimaalisesti, tästä seurauksena aurinkosähkön ja -lämmön maksimointi sekä edelleen alhaisemmat aurinkoenergian tuotantokustannukset pienempiin järjestelmiin verrattuna. 1 MW:n aurinkosähköjärjestelmä edellyttää karkeasti noin 3,5-4,0 hehtaarin maa-aluetta, kun huomioidaan myös järjestelmän edellyttämät huoltoajoväylät. Maa-alan tarpeeseen vaikuttavat paikallisten lähtökohtien lisäksi muun muassa kallistuskulma, tekniset ratkaisut ja huoltokäytävät. [35] Aurinkoenergialaitteiden sijainnilla, kallistuskulmalla ja suuntauksella on merkittävä vaikutus niiden optimaaliseen toimintaan ja energiantuottoon. Suuntauksella tarkoitetaan atsimuuttikulmaa eli tason poikkeamaa etelästä. Kallistuskulmalla tarkoitetaan vaakatason ja laitetasen välistä kulmaa. Atsimuuttikulma on määritelty siten, että suuntaus etelään on 0° , länteen $+90^\circ$ ja itään -90° . Kuvassa 9. on esitetty aurinkopaneelin/-keräimen suuntakulma ja kallistuskulma.



Kuva 9. Kallistus- ja suuntakulmat. [32]

Aurinkokeräimet ja etenkin aurinkopaneelit tulee sijoittaa varjottomaan paikkaan. Tämä korostuu erityisesti talvella, jolloin aurinko on Suomessa alhaalla ja varjot

pitempiä kuin kesällä. Mitä korkeammalla, ylempänä tai kauempana lähimmästä rakennuksesta, puusta tai esimerkiksi toisesta aurinkopaneelistä/-kennosta taso sijaitsee, sitä enemmän ne voivat tuottaa energiaa. Aurinkoenergiajärjestelmä asennetaan yleensä kiinteäkulmaisena (kallistuskulma) kohti etelää (atsimuuttikulma 0°). Kiinteä asennus on luotettava ja taloudellinen huomioiden Suomen haastavat talviolosuhteet. Aurinkoenergiailaitteesta saadaan paras mahdollinen teho silloin, kun auringonsäteily osuu tasoon kohtisuoraan eli kun tulokulma on 0° . Tulokulmalla tarkoitetaan siis auringonsäteilyn ja tason normaalin välistä kulmaa. Aurinkoenergiailaitteen optimaalinen kallistuskulma riippuu auringon korkeudesta horisontilla, joka puolestaan vaihtelee vuoden- ja vuorokauden ajan sekä sijaintipaikan leveysasteen (latitudi) mukaan. Kiinteäkulmaisissa järjestelmissä kallistuskulma on vakio ja se määritetään ainoastaan sijaintipaikan mukaan. Eli kiinteäkulmaisissa järjestelmissä ei seurata auringon liikettä. [30]

5 TUULIVOIMAN HYÖDYNTÄMINEN

Kaikki uusiutuvat luonnonvarat ja jopa fossiiliset polttoaineet ovat viimekädessä peräisin auringosta. Auringon säteilyn teho ilmakehän ulkorajalla on suuruusluokkaa 1370 W/m^2 . Noin kahdesta kolmeen prosenttia auringosta tulevasta energiasta muuttuu liike-energiaksi eli tuuleksi, jota voidaan hyödyntää tuulienergian tuotannossa. [17]

Tuulienergia on sen päästöttömyyden ja valtavan potentiaalin vuoksi erittäin merkittävä vaihtoehto muiden uusiutuvien energiamuotojen ohella korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Tuulienergiaa on saatavilla kaikkialla maapallolla ja se on ehtymätön ja puhdas luonnonvara. [17]

5.1 Tuulivoimaprojektin toteutusedellytykset

Sijoituspaikan valinta edellyttää usein kompromisseja eri tekijöiden välillä. Kaikkia toteutusedellytyksiä täyttäviä suotuisia kohteita on vain harvassa. Tuulisin kohde ei välttämättä ole paras mahdollinen; muut edellytykset ovat usein ratkaisevia. Näitä tekijöitä ovat tuulivoimaloiden sijoitteluun liittyvät kysymykset, ympäristötekijät, maan alueen saatavuus, maankäyttö ja asutus, sekä infrastruktuuri eli tie- ja sähköverkko. Hyvänä apuna potentiaalisia sijoituspaikkoja etsittäessä voidaan pitää esimerkiksi alueellisia tuulivoimakartoituksia. [16, s. 31]

5.1.1 Tuulisuus

Tuulivoimalaitosten sijoituskohdetta valittaessa ja projektin toteutusedellytyksiä arvioitaessa tulee kiinnittää erityistä huomiota tuulisuuden ja laitosten tuotannon arviointiin. Suomi on useimpiin tuulivoimaa laajasti hyödyntäviin maihin verrattuna melko kohtalaisen metsäinen maa. Suomesta puuttuvat käytännössä kokonaan laajat, yhtenäiset, avoimet laidun- ja peltomaat, joille tuulivoimaa pääasiassa rakennetaan esimerkiksi Keski-Euroopan rannikkoseuduilla. Suomessa tuuliolosuhteet rannikoilla ja saaristossa sekä Lapin tuntureilla ovat yleisesti ottaen suotuisat tuulivoiman tuotantoon. Korkeimmalle ympäristöstään kohoavien tunturien lakialueet ovat Euroopan mittakaavassa hyvää luokkaa ja rannikkoalueetkin keskitasoa. Tuuliolosuhteiltaan kohtalaisen suotuisia alueita voi löytyä myös suurten järvien rannoilta ja saarista sekä kaikkien laajimmilta peltoaukeilta rannikoilla. Sisä-Suomessa ratkaiseva tekijä on sijoituspaikan korkeus ympäröivästä maastosta, ei niinkään sen maantieteellinen sijainti. Suunnitellun sijoituskohteen tuuliolosuhteita voidaan arvioida tietokoneavusteisesti Tuuliatlaksen ja tarkoi-

tukseen soveltuvan tietokoneohjelman (esimerkiksi WA^SP-ohjelman) avulla. Tuuliatlakseen on koottu tuulisuustietoja eri puolilta Suomea. WA^SP-ohjelman avulla voidaan kuttakin sijoituskohdetta tarkastella syöttämällä ohjelmalle ympäröivän maaston tarkka kuvaus ja yhdistämällä se Tuuliatlakselta saatavaan alueelliseen tuulisuustiedostoon. Tulokseksi ohjelmasta saadaan tuulen keskinopeus kyseisessä kohteessa halutulla tarkastelukorkeudella, tuulen nopeusjakauman Weibull-parametrit sekä kohteeseen sijoitettavan tuulivoimalaitoksen vuosituotantoarvio. Mikäli sijoituskohdetta vastaavista kohteista ei ole mittaustuloksia, on tuulisuus- ja tuotantoarvion tulokset varmennettava tuulimittauksilla. [16, s. 32-34]

5.1.2 Infrastrukturi

Tuulivoiman sijoituskohdetta valittaessa on sähköverkon läheisyys yksi tärkeä kriteeri. Lisäksi sähköverkon vahvuus eli kyky ottaa vastaan tuotettu sähköteho ja tasoittaa tehonvaihtelut luo rajoituksia tuulivoiman rakentamiselle. Hyvät tieyhteydet ovat niinkään teknistaloudellisena edellytyksenä tuulivoiman rakentamiselle. Tietä ei kannata hankalassa maastossa rakentaa ainakaan kovin pitkiä matkoja. Vaatimukset kuljetukseen käytettävän tiestön suhteen vaihtelevat erikokoisten ja –tyyppisten tuulivoimalaitosten suhteen jossain määrin toisistaan, mutta yleisesti ottaen normaalikuntainen päällystämätön tie soveltuu sellaisenaan pystytyskaluston ja suurtenkin laitosten kuljetukseen. Suurten tuulivoimapuistohankkeiden ollessa kyseessä voidaan tietä ja sähkölinjaa rakentaa useita kilometrejä ilman, että hankkeen talous kärsii merkittävämmiin. Näin erityisesti mikäli tällä tavoin päästään rakentamaan tuuliolosuhteiltaan huomattavasti parempaan kohteeseen. Pienissä tuulivoimahankkeissa tulee pyrkiä ehdottomasti tie- ja sähköverkon rakentamisen minimointiin. [16, s. 35]

Tuulivoimalaitoksia on usein kannattavaa rakentaa useita kerralla, joko samaan kohteeseen tai useampiin lähekkäisiin kohteisiin. Tällöin erityisesti suurten yli 1 MW:n kokoluokan laitosten pystytys tulee huomattavasti edullisemmaksi, koska laitosten pystyttämiseen vaadittavien suurten nostureiden hankinta on merkittävä kustannuserä, joka ei riipu pystytettävien laitosten lukumäärästä. Edellä mainitut tekijät puoltavat tuulivoimaloiden rakentamista sellaisiin kohteisiin, joissa tie- ja riittävän vahva sähköverkko tulevat perille sijoituskohteeseen asti. Tällaisia kohteita ovat muun muassa piensatamat sekä teollisuus- ja voimalaitosalueet. Tällaisissa kohteissa eivät myöskään ympäristötekijät yleensä muodostu yhtä kriittisiksi kuin rakennettaessa koskemattomaan luontoon. [16, s. 36]

5.1.3 Maanomistus ja –käyttö, maa-alan tarve sekä ympäristötekijät

Tuulivoiman sijoituskohteen rakentamisedellytyksiin ja vaadittaviin lupaprosesseihin vaikuttaa oleellisesti ympäröivien alueiden maankäyttö. Tuulivoimalaitoksien

rakentamista säätelevät samat lait ja asetukset kuin muutakin rakentamista, koska tuulivoimalaitokset tulkitaan pääsääntöisesti rakennuksiksi. Tuulivoimahankkeen valmistelussa on tarvittavien lupien selvittämiseksi syytä olla jo varhaisessa vaiheessa yhteydessä muun muassa ympäristölautakuntaan ja rakennuslupaviranomaisiin, alueelliseen ympäristökeskukseen, ilmailulaitokseen (lentoestemääräykset), museovirastoon ja niin edelleen.

Tuulivoiman ympäristövaikutukset ja niistä aiheutuvat maankäyttöön liittyvät kysymykset on otettava huomioon jo alusta lähtien sopivaa sijoituskohdetta etsittäessä. Tuulivoimalaitoksen lapojen liikkeestä syntyvä suhina aiheuttaa tuulivoimalaitokselle ominaisen äänen, jonka tasamaalla voi erottaa luonnon taustäänistä 200-300 metrin etäisyydelle. Näin ollen tuulivoimalaitoksia ei tulisi rakentaa alle 300 metrin etäisyydelle asuinrakennuksista. Tuulivoimalaitoksen aiheuttama ääni voi jossain olosuhteissa kantautua huomattavasti kauemmaksi, jos laitokset sijaitsevat ympäristöään korkeammalle. Mikäli laitosten sijoituspaikan alueella on muista lähteistä, esimerkiksi teollisuus tai liikenne, aiheutuvaa taustamelua, häipyä laitosten käyntiääni kuuluvista jo huomattavasti lyhyemmällä etäisyyksillä. Myös metsällä on käyntiääntä vaimentava vaikutus.

Tuulivoimalaitoksia ei tule pääsääntöisesti sijoittaa luonnonsuojelualueille tai muihin maisemaltaan tai luonnoltaan erityisen herkkiin kohteisiin. Laissa määritellyille suojelualueille rakentaminen ei ole lainkaan mahdollista. Virkistysalueille rakentaminen puolestaan on monissa tapauksissa mahdollista, ellei kyseessä oleva virkistysalue ole poikkeuksellisen arvokas ja luonnontilainen tai maisemallisesti merkittävä. Mikäli tarkasteltavalla tuulivoimalaitoksen sijoituskohde on kulttuurihistoriallisesti merkittävä, esimerkiksi alue on vanhaa kulttuurimaisemaa tai sijoituskohteen alueella kulttuurihistoriallisesti arvokkaita rakennuksia tai kyläyhteisöjä ja muinaismuistoja, saattaa rakennusluvan saanti olla vaikeaa. Maisema- ja meluvaikutusten ohella saattavat vaikutukset linnustoon olla merkittäviä tapauskohtaisesti. [16, s. 37]

Tuulivoimalaitoksia ei tule sijoittaa liian lähelle toisiaan, koska laitokset aiheuttavat tuulen alapuolelle pyörteitä ja vaimentavat tuulta. Tuulen vaimeneminen (varjos- tusvaikutus) pienentää tuotetun energian määrää. Ratkaisevampi tekijä on kuitenkin varjoon jäävien laitosten lapoihin, laakereihin, vaihteistoon jne. kohdistuvat pyörteisyyden aiheuttamat rasitukset, jotka lyhentävät laitosten käyttöikä. Alueilla, joilla tuulen suuntajakauma ei ole voimakkaasti painottunut tiettyyn suuntaan, tulisi laitosten välinen minimietäisyys olla vähintään viisi kertaa roottorin lapojen kärkiväli (5D). Jos laitoksia rakennetaan vain muutama, voidaan käyttää lyhyempiä etäisyyksiä (3,5-4D) laitosten välillä. Mikäli rakennettavia laitoksia on paljon ja ne on tarkoitettu sijoittamaan useisiin riveihin, etäisyyksien tulisi ainakin yleisimmissä tuulensuunnissa olla suuremmat, jopa 7-8D. Edellisestä johtuen tuulivoiman tuotanto vaatii runsaasti maa-alaa tuotettua tehoa kohti. [16, s. 38]

5.2 Tuulivoimatuotantoon soveltuvien alueiden kartoitus

Pirkanmaan liiton laatiman Voimaa tuulesta Pirkanmaalla -selvityksen tavoitteena on ollut löytää Pirkanmaalla tuulivoimatuotantoon parhaiten soveltuvia alueita. Tuulivoimaselvityksen taustalla ovat valtakunnalliset alueidenkäyttötavoitteet, jotka edellyttävät tuulivoimarakentamiselle parhaiten soveltuvien alueiden osoittamista maakuntakaavotuksessa. Tarkasteltavana on ollut alueita, joiden välittömässä läheisyydessä ei ole asutusta tai erityisiä ympäristöarvoja ja joilla muutoinkin yhteensovittamisen tarve tuulivoimatuotannon ja muun alueidenkäytön välillä on vähäinen. Selvityksessä on pyritty löytämään soveltuvia alueita erityisesti jo rakennettujen alueiden läheisyydestä esimerkiksi teiden ja ratojen varsilta. Tarkasteltujen alueiden soveltuvuuden edellytyksenä on myös, että alue on teknistaloudellisesti toteutettavissa, mikä tarkoittaa erityisesti sitä, että alueella tuulee riittävästi ja se on järkevin kustannuksin liitettävissä sähkö- ja tietverkkoon. [14, s.8]

Selvityksessä tarkasteltavat alueet on koottu kunta- ja kansalaiskyselyjen pohjalta Pirkanmaan liiton toimesta. Kyselyissä kunnilta ja kansalaisilta kerättiin ehdotuksia tuulivoimatuotantoon soveltuvista alueista sekä mielipiteitä tuulivoimasta. Kansalaiskyselyn palautteet olivat sekä tuulivoiman puolesta että tuulivoimaa vastaan. Huolta aiheuttivat maisemaan ja meluun liittyvät vaikutukset sekä taloudelliset hyödyt. Toisaalta tuulivoimalat nähtiin myös positiivisena elementtinä maisemassa. Tuulivoiman ympäristöystävällisyyttä ja saasteettomuutta pidettiin hyvänä myös paikallisen imagon kannalta. [14, s.10]

Selvityksen alkuvaiheessa on paikkatietotarkastelulla rajattu tarkastelusta pois alueet, joilla nykyinen maankäyttö muodostaa esteen tuulivoimaloiden rakentamiselle. Rajauksen ulkopuolelle jäivät alueet, jotka sijaitsevat:

- yhden kilometrin etäisyydellä vakituisesta ja loma-asutuksesta
- arvokkailla maisema-alueilla ja kulttuuriympäristöjen alueilla
- luonnonsuojeluohjelmien piirissä sekä Natura 2000-alueilla

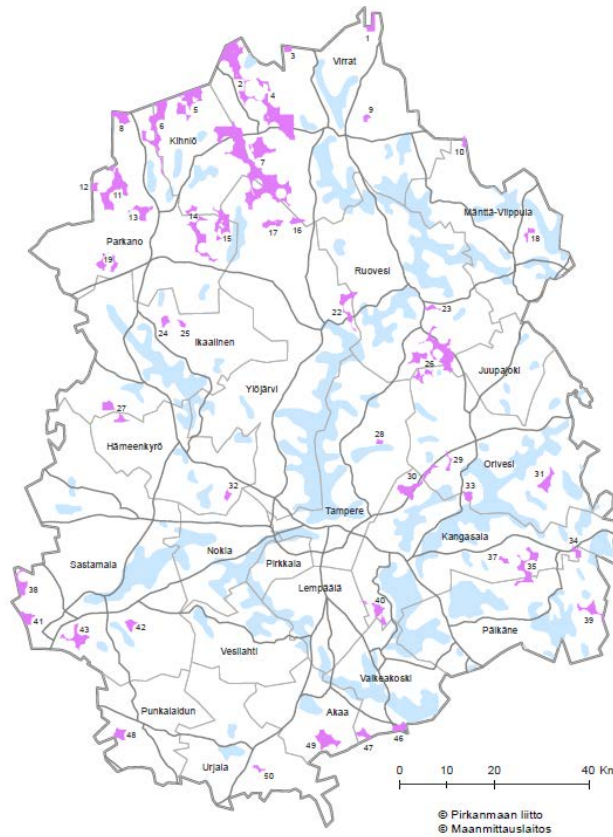
Rajauksen jälkeen jäljelle jäi 448 mahdollista tuulivoimatuotantoon soveltuvaa aluetta. Jäljelle jääneille alueille muodostettiin paikkatietotarkasteluilla taulukossa 6. kuvatut suojaetäisyydet ja reunaehdot, jotka potentiaalisten tuulivoima-alueiden tulee jatkotarkastelussa täyttää. Tämän rajauksen jälkeen varsinaisia tuulivoiman selvitysalueita jäi jäljelle 45.

Taulukko 6. Tuulivoima-alueiden karsinnassa käytetyt suojaetäisyydet ja reunaehdot. [14]

Muuttuja	Suojaetäisyys/ reunaehto	Viite
Vuoden keskituulennopeus	6 m/s 100 metrin korkeudessa	Ilmatieteenlaitos, Tuuliatlas (2,5 km x 2,5 km ruutu)
Pinta-ala	$\geq 1 \text{ km}^2$	Teoreettinen minimipinta-ala tuulivoimapuistolle
Vesistöt	Ei sijoitusta vesistöihin	-
Lentoasemat (Tampere-Pirkkala, Halli)	18 km	Finavia
Kevytlentopaikat (Hämeenkyrö, Teisko)	3 km	Finavia, Puolustusvoimat
Varalaskupaikat (Niinisalo)	12 km	Puolustusvoimat
Sääasemat (Ikaalinen)	5 km	Ilmatieteenlaitos
Puolustusvoimien alueet	Suojavyöhykkeet käyty läpi tapauskohtaisesti	Puolustusvoimat
Luontomatkailun alueet (Seitsemisen ja Helvetinjärven kansallispuistot sekä Aurejärvi, Vatulanharju-Ulvaanharjun alue) Tutkimusmetsät	Ei sijoitusta alueille	Pirkanmaan 1. maakuntakaava

Jäljelle jääneelle 45:lle tuulivoiman selvitysalueelle on tehty yleispiirteiset vaikutusten arvioinnit liittyen muun muassa Natura 2000-alueisiin. Nämä alueet on esitetty kuvassa 10. Arvioinnissa on otettu huomioon myös alueiden vaikutukset sekä valtakunnallisesti että maakunnallisesti arvokkaisiin maisema-alueisiin ja kulttuuriympäristöihin. Lisäksi on selvitetty alueiden liitettävyyttä sähköverkkoon. Arvioinnit jatkotarkastelun 45:n tuulivoima-alueen aiheuttamista vaikutuksista maisemaan ja kulttuuriympäristön arvo-kohteisiin on muodostettu etäisyystarkastelun kautta. Arvioinneissa on oletettu, että vielä noin 3 km etäisyydellä tuulivoimalat voivat hallita maisemakuvaa. Vaikutusten merkitys pienenee selkeästi etäisyyden kasvaessa. Arvioinneissa tarkastelu on ulotettu noin 12 km etäisyydelle tuulivoiman selvitysalueista. Tarkasteluetäisyyksien lähtökoh- tana on ollut useissa eri puolille Suomea laadituissa YVA-menettelyissä määritellyt etäisyysvyöhykkeet, niiden perusteella laaditut vaikutusten arvioinnit sekä kyseisissä YVA-menettelyissä annetut yhteisviranomaisen lausunnot. Lisäksi tarkasteluvyöhyk- keiden pohjana ovat olleet tuulivoimarakentamisen valtakunnalliset ohjeistukset. Selvi- tyksessä on taulukoitu tuulivoiman selvitysalueiden tiedot maiseman ja rakennetun kult- tuuriympäristön valtakunnallisista ja maakunnallisista arvokohteista etäisyysvyöhykkei- den mukaisesti (3 km ja 12 km etäisyys tuulivoiman selvitysalueesta). Lopuksi selvi- tyksessä on esitetty yleisarvio tuulivoiman selvitysalueiden aiheuttamista vaikutuksista sekä alueiden maisemallisesta soveltuvuudesta tuulivoimarakentamiseen. [15, s. 3] Läh- tökohtana kaikissa taustaselvityksissä on käytetty tällä hetkellä markkinoilla olevaa ta-

vanomaista kolmilapaista teholtaan 2-3 MW:n tuulivoimatyyppiä, jonka napakorkeus on noin 120 metriä. [14]



Kuva 10. Jatkotarkastelun 45 tuulivoima-alueita. [14]

Läntisen Tampereen alue ei ole ollut mukana tarkasteltavien tuulivoima-alueiden joukossa, koska se ulottuu niin lähelle Pirkkalan lentokenttää, jolloin alue jää kentän 18 km suojavyöhykkeen sisään. Alue ulottuu AGA M3-6 eturajoituspinnan alueelle. Mikäli tälle suojavyöhykealueelle suunnitellaan korkeita rakennuksia, tulee alueelle hakea Finnavialta lentoestelupaa. On todennäköistä, että lupaa tuulivoimarakentamiselle ei myönnettäisi tai jos lupa myönnettäisiin, niin alueelle rakennettavien rakennusten korkeus olisi rajattu. Tällöin maakuntakaavan tavoite toteuttaa teollisen kokoluokan (teho: 2-3 MW, voimalan korkeus noin 200 metriä maanpinnan korkeus huomioiden) ei toteudu. Maakuntakaavassa esitettävät alueet on pyritty valikoimaan siten, että suurimmat esteet tuulivoima-alueiden toteuttamiselle on suljettu pois ja tämän vuoksi esterajoituspinnan sisään jäävät alueet on rajattu tuulivoimatuotantoon soveltuvien alueiden ulkopuolelle. Asutuksen läheisyys (1 km suojaetäisyys voimalasta) ja Kaakkurin suosimien Natura-alueiden läheisyys on myös puoltanut alueen pois jättämistä tarkasteluista. Maakuntakaava varten tarkasteltavien tuulivoima-alueiden tulisi lisäksi olla isoja pinta-alaltaan yli 1 km² alueita, jonne olisi mahdollista sijoittaa vähintään viisi voimalaa. Käytännössä useamman voimalan sijoittamiseen vaadittavat maa-alueet ovat paljon suurempia sillä

harvoin löytyy aluetta, jonka sisään voimalat voidaan sijoittaa tasaisesti huomioiden voimaloiden välinen minimietäisyys (5-8 kertaa roottorin lapojen kärkiväli). [22]

Edellä mainitut tekijät osoittavat, että Kolmenkulman alue ei ole paras mahdollinen tuulivoiman hyödyntämiseen teollisessa kokoluokassa. Tuulivoiman hyödyntämistä Kolmenkulman alueella ei tässä selvityksessä käsitellä tämän enempää.

6 BIOENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN

6.1 Bioenergian lähteet

Bioenergia on puhdasta, hiilidioksidineutraalia ja ympäristöystävällistä uusiutuvaa energiaa. Biomassoja poltettaessa vapautuva hiili sitoutuu edelleen kasvavaan biomassaan. Toisaalta biomassoja poltettaessa vapautuu saman verran hiilidioksidia kuin vapautuisi vastaavan biomassan hajotessa luonnossa. [3] Bioenergiaa saadaan biopolttoaineista, joihin lukeutuvat biomassasta eli eloperäisestä, fotosynteesin kautta syntyneistä kasvimassoista valmistetut polttoaineet. Biopolttoaineita saadaan metsissä, soilla ja pelloilla kasvavista metsä- ja peltobiomassoista sekä maatalouden, teollisuuden ja yhdyskuntien energian tuotantoon soveltuvista orgaanisista kiinteistä, nestemäisistä ja kaasumaisista biojätteistä. [1]

Biomassojen osuus energian kokonaiskulutuksesta on Suomessa teollisuusmaiden korkein. Erityisesti puu ja muut metsäbiomassat ovat hyvin keskeisessä asemassa Suomen koko energiantuotannossa, sillä kaikesta Suomessa käytettävästä energiasta noin viidennes tuotetaan puulla ja puupohjaisilla energialähteillä. Suurin osa puuenergiasta kuluu metsäteollisuuden energiantuotannossa, jossa hyödynnetään muun muassa metsähaketta ja metsäteollisuuden prosesseissa syntyviä puupohjaisia sivutuotteita ja jäteliemiä. Suomessa uusiutuvan energian suurimmat kasvutavoitteet liittyvätkin metsähakkeen käyttöön. Vuonna 2009 metsähaketta käytettiin noin 10,8 TWh ja tavoitteena on nostaa metsähakkeen käyttömäärä 28 TWh:n vuoteen 2020 mennessä. Tavoitteen toteutuessaan metsähakkeen kulutus lähes kolminkertaistuisi nykyisestä. Peltobiomassojen, biokaasuun sekä kierrätyspolttoaineiden energiakäyttö on toistaiseksi ollut vähäistä Suomessa, mutta erityisesti jälkimmäisen merkitys on kuitenkin kasvamassa, kun fossiilille polttoaineille etsitään vaihtoehtoja. Myös biomassasta valmistettavien liikenteen biopolttoaineiden merkitys on kasvussa. [3]

6.1.1 Metsäbiomassa

Valtaosa Suomen bioenergiasta on siis peräisin metsäbiomassoista, joihin lukeutuvat metsäteollisuuden bioliemet ja puutähteet kuten mustalipeä, kuori, puru ja prosessitähteet, metsähakkeet ja –murskeet, pientalokiinteistöjen polttopuu, pilke, pelletit, brikitit, kanto- ja juuripuu, puuhiili, puukaasu, energiapajut ja kierrätyspuu. Runkopuuta sellaisenaan ei juurikaan käytetä energiantuotannossa Suomessa. Välillisesti runkopuun merkitys on kuitenkin tärkeä siitä saatavien teollisuuden jäteliemien, kuoren ja muiden sivutuotteiden takia, joita voidaan edelleen hyödyntää energiantuotannossa. [1] Energian-

tuotannossa hyödynnettävästä puusta tai puutavarasta käytetään yleisesti nimitystä energiapuu. Energiapuu on metsäteollisuuden ainespuuksi kelpaamatonta puuta, kuten karsimatonta kokopuuta, karsittuja rankoja, raivauspuuta ja erilaisten hakkuualojen latvusta oksamassoja. [3]

Metsähake on yleisnimitys suoraan metsästä energiakäyttöön tuleville hakkeille eli koneellisesti haketutulle puulle. Metsähaketta hyödynnetään aluelämpölaitoksissa, kaupunkien sekä teollisuuden lämpö- ja voimalaitoksissa sekä kiinteistökohtaisissa moderneissa automatisoiduissa puulämmityslaitteistoissa. Eri tyyppiset kattilaratkaisut edellyttävät laadultaan hyvinkin erilaisia hakkeita. Suurissa laitoksissa hyödynnetään erityisesti hakkuutähdehaketta, oksista sekä laadultaan ainespuuksi kelpaamattomasta latvustosta ja pienpuusta. Hakkeen energiakäytössä erityisen suuri merkitys on hakkeen kosteudella, koska kosteus vaikuttaa hakkeen lämpöarvoon ja edelleen hakkeesta saatavaan energiahyötyyn. Eli mitä kuivempaa hake on, sitä vähemmän kuiva-aineen sisältämästä energiasta kuluu siinä olevan veden höyrytämiseen ja sitä enemmän siitä saadaan energiaa. Hake poltetaan yleensä selvästi kosteampana, vesipitoisuuden ollessa noin 20-50%, pelletteihin ja briketteihin verrattuna. [3]

Hakkeen ohella polttoaineena käytetään nykyään kasvavissa määrin myös puupellettejä. Pelletit ovat sylinterin muotoisia puristeita, joita valmistetaan mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotteista kuten kutterinlastusta, hiontapölystä ja sahanpurusta. Pellettien valmistuksessa purut, lastut ja pöly hienonnetaan, jonka jälkeen ne puristetaan pellettimatriisiin läpi. Prosessin aikana lämpötila nousee 160 asteeseen, mikä saa puukuidun ligniinin pehmenemään ja sitomaan puukuidut yhteen. Pelletit ovat puristamisen johdosta tasalaatuisia ja tiiviitä. Tiiveyden ja alhaisen kosteuspitoisuuden, kosteusprosentti 8-12, ansiosta pellettien energiasisältö on korkeampi kuin hakkeen. Pellettejä voidaan käyttää kiinteistökohtaisten järjestelmien ohella seospolttoaineena kostean hakkeen joukossa suuremmissa lämpölaitoksissa. [3, 23]

Taulukko 7. Öljyn, hakkeen sekä puupelletin teholliset lämpöarvot. [62]

Polttoaine	Tehollinen lämpöarvo	toe
Öljy	11,6 MWh/t	1
Hake	0,8 MWh/ i-m ³	0,069
Puupelletti	4,7 MWh/t	0,404

i- m³ = irtokuutiometri

6.2 Voimalaitostyypit

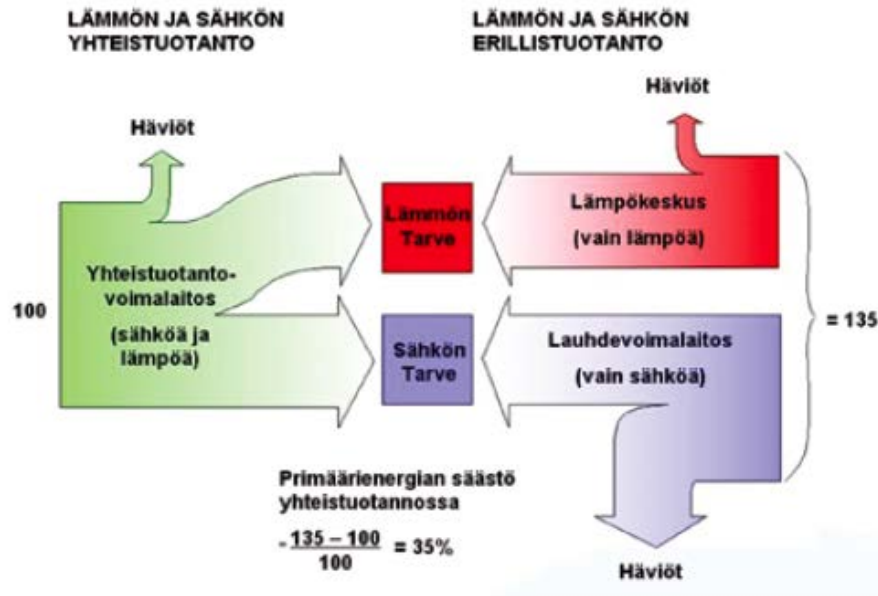
Bioenergiaa on mahdollista hyödyntää energiantuotannossa vapauttamalla biomassoihin sitoutunut energia polttamalla. Energiaa tuottavat laitokset ovat joko pelkästään lämpöä tai höyryä tuottavia lämpö- /höyrykeskuksia tai sähköä ja lämpöä/höyryä tuottavia yhteistuotanto voimalaitoksia (chp-voimalaitos, compined heat and power). [39, s. 20]

6.2.1 Höyryvoimalaitos

Höyryvoimalaitokset jakautuvat lauhde- ja vastapainevoimalaitoksiin. Lauhdevoimalaitos tuottaa ainoastaan sähköä. Vastapainevoimalaitos tuottaa sekä sähköä että lämpöä ja/tai höyryä teollisuuden tai yhdyskuntien tarpeeseen. Höyryvoimalaitoksista, jotka tuottavat sähköä ja kaukolämpöä käytetään yleisesti nimitystä kaukolämpö- tai lämmitysvoimalaitos.

Lauhdutusvoimalaitoksen kokonaishyötysuhde on parhaimmillaan noin 44-46 %. Kaukolämpöä tuottavan vastapainevoimalaitoksen kokonaishyötysuhde puolestaan on varsin korkea 85-90 %. Lämmitysvoimalaitoksessa polttoaineen käyttöä saadaan tehostettua ja kokonaishyötysuhdetta kasvatettua lauhdevoimalaitokseen verrattuna, kun lauhduttimessa vapautuva lämpö hyödynnetään nyt kaukolämmön tuotannossa. Lämmitysvoimalaitoksessa turbiinin jälkeinen höyry lauhdutetaan kaukolämmönsiirtimessä, jossa valitsee kaukolämpöveden edellyttämästä lämpötilasta (70-120 C) riippuva paine. Mitä kuumempaa kaukolämpövedettä syötetään, sitä korkeampi on vastapaine ja lyhyempi turbiinipaisunta sekä pienempi sähkönteho. Lämmitysvoimalaitoksessa vastapaine vaihtelee tällöin välillä 0,2-0,6 bar, kun lauhdevoimalaitoksen lauhduttimen paine on yleensä luokkaa 0,02-0,5 bar. [39]

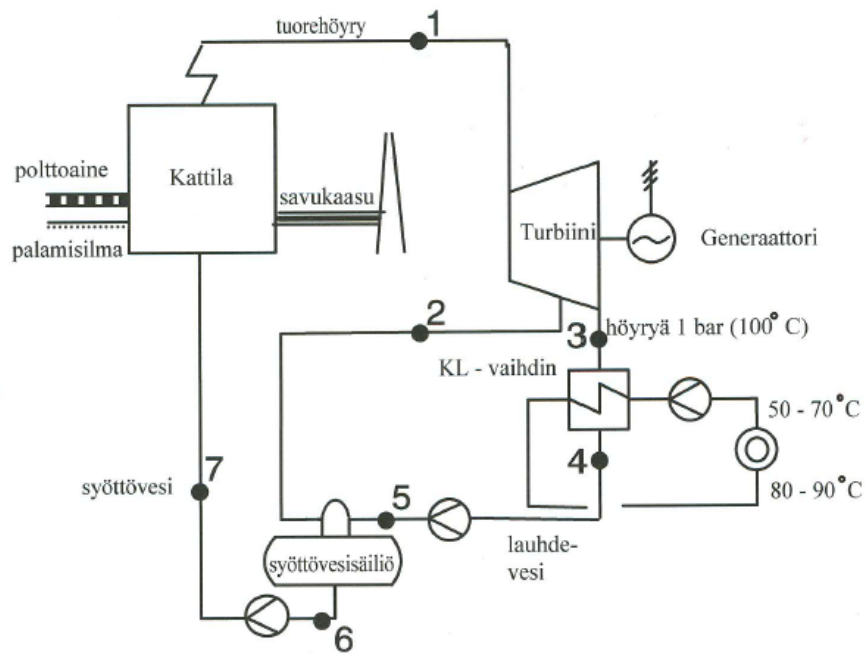
Vastapainevoimalaitoksen ensisijainen tuote on lämpö, joten laitokset mitoiteetaan lämpökuorman mukaan ja niitä myös käytetään yleensä lämmöntarpeen mukaan, milloin sähköä saadaan lämmöntuotannon ohessa sivutuotteena. Lämpöä tuotetaan pääosin talvikuukausina, mikä sopii hyvin yhteen myös sähköön kulutusvaihteluiden kanssa, sillä myös sähköön kulutushuiput osuvat talvikuukausille sähköön valaistus- ja lämmityskäytön vuoksi. Mikäli sähkö- ja lämpökuormat poikkeavat suuresti toisistaan voidaan kaukolämpöverkkoon rakentaa esimerkiksi lisäjähdytin. [55] Oheisessa kuvassa on esitetty Sankey-diagrammit sähköön ja lämmön yhteistuotannolle sekä erillistuotannolle. Sankey-diagrammit kuvaavat viitteellisesti energiavirtojen jakautuvista lämmön, sähköön ja häviöiden välillä.



Kuva 11. Sankey-diagrammit sähkön ja lämmön erillistuotannolle (oikea) sekä yhteistuotannolle (vasen). [56]

Vastapainevoimalaitoksen tärkeimpänä toimintaa kuvaavana tekijänä on rakennusaste, joka kuvaa tuotetun sähköenergian ja kaukolämmön suhdetta. Lämmitysvoimalaitoksissa rakennusaste on yleensä luokkaa 0,45-0,55. [55]

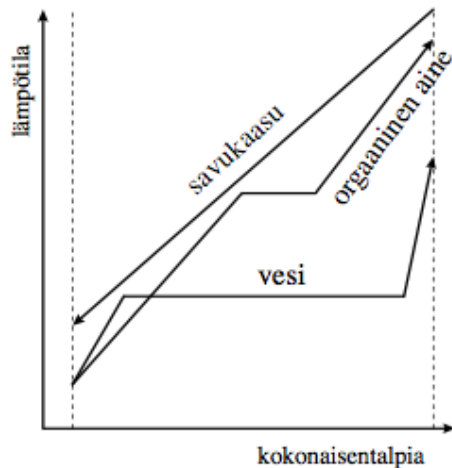
Höyryvoimalaitosten toiminta perustuu perinteisesti Clausius-Rankine-kierto-prosessiin. Polttoaineen palaessa kattilassa polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia muuttuu savukaasujen lämpöenergiaksi. Savukaasujen lämpöenergia pyritään siirtämään kattilan lämmönsiirtimien avulla mahdollisimman tehokkaasti kattilaan syötetävän veden lämmitykseen, höyrystämiseen ja höyryn lämmitykseen eli tulistukseen. Tulistetun höyryn paine- ja lämpöenergiasta saadaan osa muutettua turbiinissa sen akselia pyörittäväksi mekaaniseksi energiaksi. Turbiinin mekaanisella energialla puolestaan pyöritetään generaattoria, mistä seurauksena on sähkön muodostuminen. Höyryn tehdessä turbiinissa työtä sen paine ja lämpötila alenevat. Turbiinin jälkeen höyry muutetaan kylläiseksi vedeksi yleensä vesijäähdytteisessä lämmönsiirtimessä, jossa höyryn lauhutumisessa vapautuva lämpö siirtyy lämmön vastaanottavaan lämpenevään veteen (esim. kaukolämpövesi). Kun vesi syötetään jälleen kattilaan höyrystettäväksi saadaan aikaan kiertoprosessi. [54]



Kuva 12. Clausius- Rankine- prosessin prosessikaavio lämmitysvoimalaitokselle. [54]

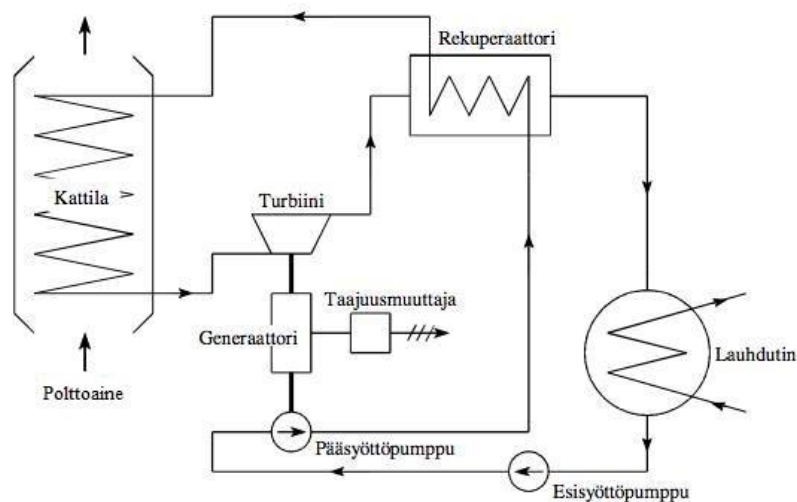
6.2.2 ORC- yhteistuotantovoimalaitos

ORC- prosessi (Organic Rankine Cycle) on Rankine-kiertoprosessi, jossa veden sijaan kiertoaaineena käytetään sopivaa orgaanista nestettä, kuten esimerkiksi tolueenia tai sili-koniöljyä. Orgaanisen nesteen suhteellinen latenttilämpö on huomattavasti alhaisempi kuin veden, jolloin orgaanisen nesteen höyrystymiseen vaaditaan pienempi määrä energiaa. Tämän seurauksena orgaanisella kiertoaaineella päästään lähemmäksi lämmönlähteen lämpötilaa ja prosessissa käytettävät lämpötila- ja painetasot ovat alhaisemmat kuin perinteisessä höyryprosessissa. ORC-prosessia on perinteisesti hyödynnetty sellaisten hukkalämpövirtojen hyödyntämisessä, joiden hyödyntäminen ei ole taloudellisesti kannattavaa tai teknisesti edes mahdollista matalan lämpötilan vuoksi. Tyypillisiä sovelluskohteita ovat voimalaitosten savukaasujen lämmön, geotermisen energian ja pienen mittakaavan kattilalaitosten sekä suurten polttomoottoreiden ja teollisuuden ylijäämälämpöjen hyödyntäminen. [60] Oheisessa kuvassa on vertailtu ORC- ja vesihöyryprosessin lämpötiladiagrammeja. Vesihöyryprosessissa tavanomaisella lämpötilatasolla ja alhaisella painetasolla veden höyrystymislämpö on hyvin suuri, minkä vuoksi tuorehöyryn lämpötila jää alhaiseksi. Sopivalla orgaanisella kiertoaaineella on mahdollista valita painetaso (samalla lämpötilatasolla) lähelle kriittistä painetta, jolloin höyrystymislämpö on suhteellisen alhainen. Näin ollen orgaanisella kiertoaaineella tuorehöyryn lämpötila saadaan korkeammaksi veteen verrattuna, vaikka pinch pointin lämpötilaeron pidetään kiertoaaineilla samana. [60]



Kuva 13. ORC- ja vesihöyryprosessien kattilan lämpötiladiagrammien vertailu. [60]

ORC-prosessi perustuu suurnopeustekniikkaan ja prossin peruskokoonpanoon kuuluvat biopolttoainekattila, lauhdutin ja turbogeneraattorilohko. ORC-prosessin kokonaishyötysuhde yhteistuotannossa on varsin korkea jopa 98 % ja rakennusaste luokkaa 0,25. Kuvassa 14. on esitetty ORC-prosessin yksinkertaistettu periaatekaavio.



Kuva 14. Suurnopeustekniikkaan perustuvan ORC-prosessin periaatekuva. [60, muokattu]

ORC-prosessille on tyypillistä, että höyry on turbiinin jälkeen reilusti tulistunutta. Prosessihyötysuhteen parantamiseksi on mahdollista sijoittaa turbiinin perään rekuperäätori, jossa tulistetun höyryn avulla esilämmitetään kattilaan syötettävää kiertoainetta. [60]

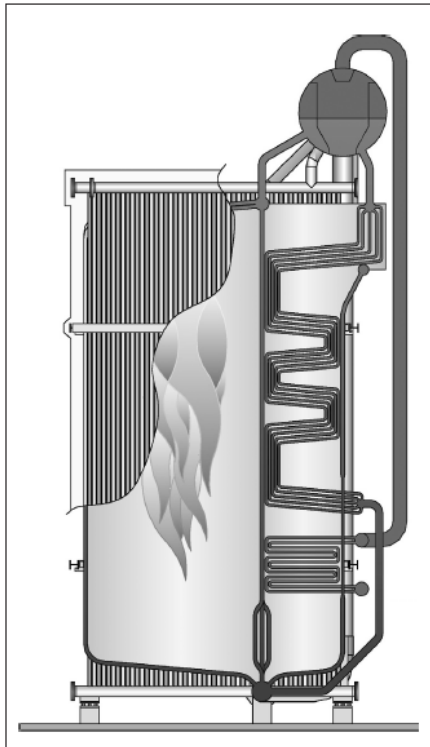
ORC-prosessi selkeä etu höyryprosessiin verrattuna on orgaanisen nesteen alhaisemman höyrystymislämmön mahdollistamat matalampi pyörimisnopeus turbiinissa sekä matalampi painetaso, mistä puolestaan seurauksena alhaisemmat materiaali vaatimukset ja edelleen pienemmät investointi- ja käyttökustannukset. ORC-prosessissa ei myöskään ilmene höyryprosessille tyypillistä korroosiota, koska ORC-prosessissa ei

käytetä vettä. Näin ollen ORC-voimalaitos on hyvin toimintavarma ja pitkäikäinen. Suomessa kaukolämpöä ja sähköä tuottavia ORC-voimalaitoksia on yksi kappale, Euroopassa vastaavanlaisia voimalaitoksia on pari sataa. [60, 61]

6.2.3 Lämpökeskus

Lämmitysvoimalaitosten ohella kaukolämpöä tuotetaan erillisillä lämpökeskuksilla. Lämpökeskukset ovat pelkästään kaukolämpöä tuottavia voimalaitoksia, joissa ei ole sähköntuotantoa. Lämpökeskukset jakautuvat tuotantorakenteeltaan kahteen kategori-
aan; lämpökeskukset, jotka toimivat lähes täydellä teholla suurimman osan vuodesta sekä huippu- ja varalämpökeskukset, jotka tuottavat lämpöä vain talven kovimmilla pakkasilla tai satunnaisesti varatehona. Peruslämpöä tuottava lämpökeskus toimii ympä-
ri vuoden huoltoseisokkeja lukuun ottamatta. Huippu- ja varalämpökeskusten polttoai-
neena on käytetty perinteisesti öljyä sen helpon varastoitavuuden takia. Huippu- ja vara-
lämpökeskusten on oltava toimintavarmoja, mutta samalla investointina edullisia. [57]

Lämpökeskusten kokonaishyötysuhde on varsin korkea, polttoaineen sisältämäs-
tä kemiallisesta energiasta saadaan siirrettyä veteen noin 85-93%. Lämpökeskusten
merkittävin hyötysuhdetta alentava tekijä on savukaasuhäviö, jonka suuruus riippuu
savukaasun happipitoisuudesta ja loppulämpötilasta. Lämpökeskuksista suurin osa on
kuumavesikattiloita, joissa veden lämpötila on alle 120°C. Kiinteällä polttoaineella toi-
mivat kattilat, kuumavesikattilat, ovat rakenteeltaan tyypillisesti vesiputkikattiloita. Ve-
siputkikattilassa virtaa putkien sisällä nimityksensä mukaisesti vesi ja savukaasut vir-
taavat putkien ulkopuolella (kuva 15.). [39]

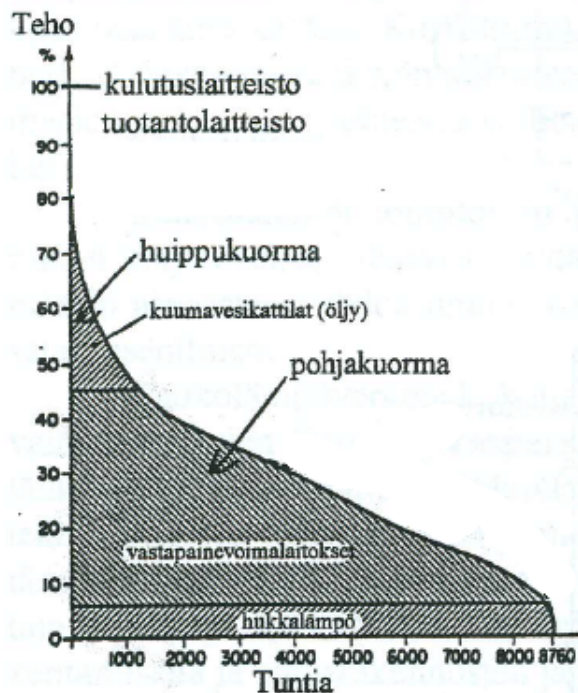


Kuva 15. Vesiputkikattila. [39]

6.3 Voimalaitosten tehomitoitus

Kaukolämpötehon tarve riippuu oleellisesti ulkolämpötilasta. Kaukolämmön kulutus on suurimmillaan talvella huippupakkasten aikaan, ja pienimmillään kesällä, jolloin kaukolämpöä kuluu lähinnä käyttöveden lämmitykseen ja lämpöhäviöihin. Koska kaukolämmön huipputehon tarve on lyhytaikainen, rakennetaan kalliit lämmitysvoimalaitokset ja kiinteän polttoaineen lämpökeskukset niin, että niiden teho on noin 50 % kaukolämmön asennetusta huipputehosta ja kaukolämpöverkkoon liitettyjen kuluttajien laitteiden maksimitehosta. Loppuosa tehotarpeesta on hoidettu perinteisesti öljykäyttöisillä lämpökeskuksilla. Tällä tavoin isolle voimalaitosinvestoinnille saadaan taloudellisesti kannattava, riittävän pitkä käyttöaika. Valtaosa kaukolämmön tarpeesta saadaan nyt tuotettua edullista polttoainetta käyttävällä voimalaitoksella alhaisin käyttökustannuksin, ja vain pieni osa lämmöntarpeesta (noin 10 %) jää jäljelle tuotettavaksi kallista polttoainetta käyttävillä mutta investointikustannuksiltaan edullisilla huippulämpökeskuksilla. [54, 55]

Kaukolämmön tuotantoon liittyviä oleellisia laskennallisia käsitteitä ovat mm. tehon pysyvyyskäyrä ja huipun käyttöaika. Kaukolämpöjärjestelmän lämpötehon pysyvyys normaalivuonna asettuu tavallisesti välille 2600-300 tuntia vuodessa. Isoissa järjestelmissä huipputehon käyttöajat ovat tyypillisesti noin 2600 h/a ja tätä suurempi pienissä järjestelmissä. Pysyvyyskäyrä ilmaisee tehontarpeen pysyvyyden, eli ajan jonka tehontarve on vähintään tietyn suuruinen. Oheisesta kuvassa ilmenee pohjakuormalaitoksina toimivien vastapainevoimalaitosten tyypillinen mitoitusperuste, noin 50 % maksimitehosta. [55]



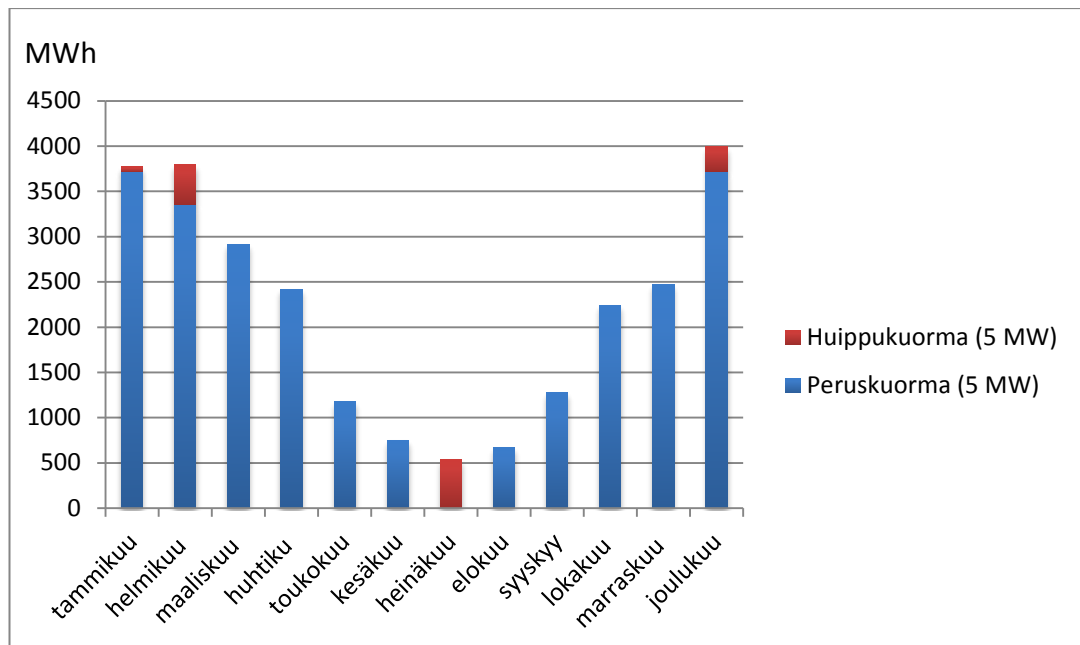
Kuva 16. Tyypillinen mitoitusperuste pysyvyyskäyrällä. [55, muokattu]

6.3.1 Kolmenkulman biovoimalaitoksen mitoitus ja energiantuotantopotentiaali

Kaukolämmön tarve määräytyy rakennusten tilojen sekä käyttöveden lämmitystarpeesta. Rakennusten lämmitysenergiatarvetta voidaan arvioida rakennusten pinta-alojen/tilavuuksien avulla. Rakennusten vuotuista lämmitysenergian jakautumista eri kuukausille voidaan arvioida lämmitystarvelukujen perusteella. Lämmitystarveluvun hyödyntäminen rakennusten lämmitystarpeen arvioinnissa perustuu siihen, että rakennusten lämmitysenergiankulutus on suurin piirtein verrannollinen sisä- ja ulkolämpötilojen erotukseen. Käyttöveden lämmittämiseen kuluva energiaosuus tulee erottaa normeerattavasta lämmitysenergian kulutuksesta, koska sen osuus ei juurikaan ole verrannollinen ulkolämpötilaan. Lämpimän käyttöveden osuus rakennuksen lämmitysenergian tarpeesta on tyypillisesti noin 25 % [48, 49]

Kaukolämpölaitoksen tehon tulee kattaa kiinteistöjen edellyttämän energiatarpeen lisäksi myös kaukolämpöverkostossa tapahtuvat siirtohäviöt. Verkoston siirtohäviöiksi voidaan arvioida noin 6-9% tuotetusta lämpöenergiasta. Kolmenkulman alueella saadaan 10 MW:n lämpöteholla ja 2600 h huipunkäyttöajalla vuotuisesti kaukolämmön tuotannoksi noin 26 000 MWh. Kuvassa 17. on esitetty Kolmenkulman 26 000 MWh:n lämmöntuotannon vuosivaihtelu eri kuukausille. Kuvasta selviää lisäksi lämmöntuotannon jakautuminen perus- ja huippukuormalaitosten kesken. Voimalaitosten mitoituspe-

rustaksi on 10 MW:n kulutuslaitteiston huipputeho. Perusvoimalaitoksen tehoksi tulee tällöin noin puolet (5 MW) ja loput puolet jää huippukuormalaitoksen tehoksi. Näin peruskuormalaitoksen osuus tuotetusta energiasta on noin 89 %. Huippukuormalaitoksella tuotetun energian osuudeksi jää noin 11% . Kuvassa 17. on arvioitu peruskuormalaitoksen huoltoseisokki heinäkuussa, jolloin lämpö tuotetaan huippukuormalaitoksella.



Kuva 17. Kolmenkulman alueen lämmöntuotannon (10 MW) vuosivaihtelu kuukausitasolla sekä jakautuminen huippu- ja peruskuormalaitosten kesken.

Kun tuotetusta lämpöenergiasta (26 000 MWh) vähennetään kaukolämpöverkon siirtohäviöihin (arviolta 9 %) kuluva lämpöenergia, jää jäljelle energiamäärä, jolla voidaan kattaa alueen lämmitystarvetta (23 660 MWh). Tämä energiamäärä puolestaan riittää kattamaan suurin piirtein 303 300m²:a teollisuus- ja varastorakennuksia, kun nykyaikaisen teollisuus- ja varastorakennusten lämpöenergiankulutukseksi oletetaan 80 kWh/m²/a.

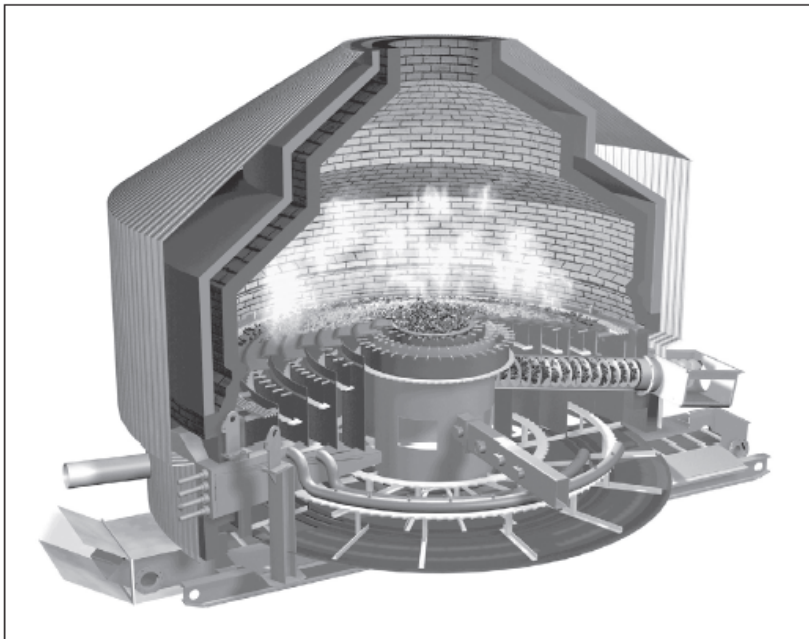
6.4 Biopolttoaineiden polttotavat

Biopolttoainetta käyttävissä voimalaitoksissa ja lämpökeskuksissa on perinteisesti hyödynnetty arina- ja leijupolttoa. Arinapoltto on perinteinen ja yleisin polttotapa alle 10 MW:n kokoluokassa. Leijupoltto on pitkälti syrjäyttänyt arinapolttotekniikan yli 10 MW:n tehoalueella.

6.4.1 Arinapoltto

Arinapoltto on vanhin polttomuoto ja se on alun perin kehitetty kivihiilen polttoa varten. Nykyään arinapolttoja sovelletaan usein biomassan polttoon tehoalueella 2-30 MW. Arinapoltto on alle 10 MW teholuokassa edelleen suosituin puun ja palaturpeen polttomenetelmä. Arinoiden ja niihin liittyvien tulipesien rakenteet riippuvat kattilan koosta ja hyödynnettävästä polttoaineesta. Päätyyppejä ovat kiinteä tai mekaaninen arina sijoitettuna joko vaakatasoon tai viistoon. Arinarakenteet ovat usein edellä mainittujen päätyyppien yhdistelmiä ja ne eroavat toisistaan materiaalien ja jäähdytystapojen osalta. [40, s. 16]

Arinapoltossa kiinteä polttoaine poltetaan kattilan pohjalla olevan arinan päällä. Polttoaineen syöttö arinalle tapahtuu koko sen leveydeltä tasaisena kerroksena, mikä on ensiarvoisen tärkeää palamisen hallitsemiseksi, koska polttoaine sekoittuu huonosti leveyssuunnassa. Palamisilma puhalletaan arinan läpi sekä arinan yläpuolelta. Kuvassa 18. on esimerkki suomalaisesta kekoarina, jossa leveyssuuntainen sekoitus on toteutettu pyörivien sylinterimäisten vyöhykkeiden avulla. Nykyisellä arinatekniikalla on mahdollista polttaa tehokkaasti laadultaan hyvinkin vaihtelevia polttoaineita. Arinapoltto soveltuu erityisrakenteisilla polttimilla myös erittäin märälle (kosteuspitoisuus noin 60%) polttoaineelle. Polttoaineen palakoon määräytyy ensisijaisesti polttoaineen syöttötekniikasta. Arinapolton etuina voidaan pitää alhaista omakäyttösähkö tehon tarvetta leijupolttoon verrattuna. Puutteita ovat mm. epätäydelliseen palamiseen liittyvät päästöt, jotka aiheutuvat tehottomammasta kaasujen sekoittumisesta leijupolttoon verrattuna, hitaat säätöominaisuudet ja liikkuvien arinarautojen huollontarve. [40]



Kuva 18. Pyörivä kekoarina (MW Power) kosteiden polttoaineiden polttoon. Polttoaine syötetään syöttöruuvilla alaspäin arinan keskelle kekoon, josta se kulkeutuu vähitellen ulkokehää kohti arinarautojen kehäliikkeen vaikutuksesta. [40]

6.4.2 Leijupoltto

Leijupoltto on vakiinnuttanut markkina-asemansa keinona polttaa ympäristöystävällisesti erilaisia kiinteitä polttoaineita. Leijupolttotekniikka soveltuu erityisen hyvin huonolaatuisille polttoaineille, joita ei onnistuta muilla tavoin polttamaan ilman monimutkaisia erikoisjärjestelyitä. Leijupoltossa polttoaineen palaminen tapahtuu palamattoman ja jauhemaisen petimateriaalin muodostaman kerroksen (leijupedin) sisällä, jota leijutetaan johtamalla palamiseen tarvittava ilma sopivalla nopeudella leijukerrokseen sen pohjalla olevan arinan kautta. Leijupeti muodostuu kiinteästä petimateriaalista (yleensä hiekka), siihen syötettävästä polttoaineesta, mahdollisesta kalkkikivestä, ilmasta sekä palamisessa syntyvästä savukaasusta. Leijukerros polton eduksi voidaan katsoa mahdollisuutta käyttää erilaisia polttoaineita, edullista rikin talteenottoa, sekä vähäisiä typpioksidien ja palamattomien päästöjä. Leijukerros poltto ei edellytä polttoaineen esikäsitteilyä (kuivaus, jauhaus) ja polttoaineen nopeat ja suuretkin laatuvariaatiot ovat mahdollisia. Haittana voidaan pitää suurta omakäyttötehoa. Lisäksi kattilan säätöjärjestelmän tulee olla erittäin luotettava, koska leijukerros ei saa missään olosuhteissa sulaa. [39, 41]

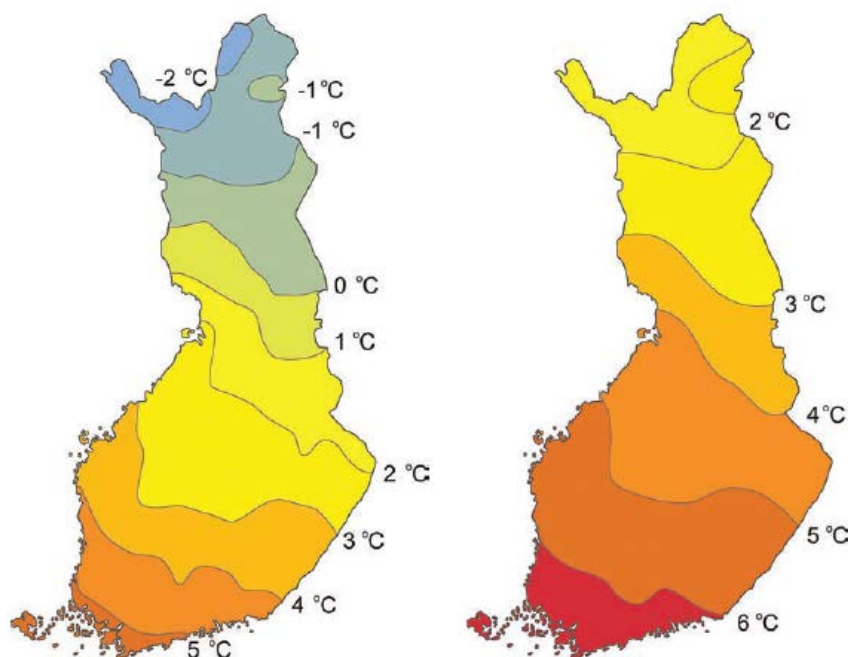
Leijupoltto voidaan toteuttaa joko kerrosleijukattiloissa tai kiertoleijukattiloissa. Kerrosleijukattiloissa leijukerros hiukkaset ja petimateriaali pysyvät leijukerrossa, kun taas kiertoleijukattilassa ne kulkeutuvat leijutuskaasun mukana leijutustilasta, minä vuoksi ne on jatkuvuustilan ylläpitämiseksi palautettava takaisin erillisillä erotus- ja kierrätyslaitteilla. Kiertoleijukattiloilla on kerrosleijukattiloihin verrattuna matalammat typenoksidi- ja rikkidioksidipäästöt sekä laajempi polttoainevalikoima. Kerrosleijukattilan etuna voidaan pitää soveltuvuutta myös hyvin märille ja/tai matalalämpöarvoisille polttoaineille ja yksinkertaisesta rakenteesta johtuvaa edullista hintaa, mikä korostuu erityisesti pienten polttolaitosten kokoluokassa. Kiertoleijukattiloita hyödynnetään pääosin suuremmassa, yli 50 MW kokoluokassa. Kerrosleijukattiloita on saatavissa 10 MW:sta ylöspäin useisiin satoihin megawatteihin asti. [39]

7 MAALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN

7.1 Mitä on maalämpö

Maalämmössä hyödynnetään maa- ja kallioperän pintaosiin varastoitunutta lämpöenergiaa, joka on peräisin auringosta. Syvemmältä kallioperästä saadaan lämpöenergiaa, joka on peräisin lämpimistä pohjavesivirtauksista sekä radioaktiivisten aineiden hajoamisesta (geotermien energia).

Maa- ja kallioperän pintaosien vuotuinen keskilämpötila Suomessa on noin kaksi astetta korkeampi verrattuna ilman vuotuisen keskilämpötilaan. Tämä lämpötila vaihtelee maantieteellisen sijainnin lisäksi myös paikallisesti. Suomessa maanpinnan keskilämpötila vakiintuu, vuosittaisesta ilmalämpötilan vaihtelusta huolimatta, noin 14-15 m syvyydessä keskimäärin 5-6 asteeseen. Mentäessä syvemmälle kallioperässä geotermien energia nostaa kallioperän lämpötilaa keskimäärin 0,5-1 astetta/ 100 m. Eli Etelä-Suomessa kallioperän lämpötila 200 m syvyydessä on noin 6-8 °C. Kallioperän lämpöominaisuuksiin vaikuttavat tekijät ovat muun muassa kallioperän koostumus, rikkonaisuus ja pohjaveden liikkeet. Kallioperän rikkonaisuus ja pohjaveden liikkeet tehostavat lämmön siirtymistä maaperässä. Toisaalta kallioperän rikkonaisuus voi hankaloittaa lämpökaivojen porausta ja niiden rakenteiden pysyvyyttä. [36]



Kuva 19. Ilmalämpötilan vuotuinen keskiarvo mittauskaudelta 1971-2000 (vasemmalla) ja maanpinnan lämpötilan vuotuinen keskiarvo (oikealla) [36]

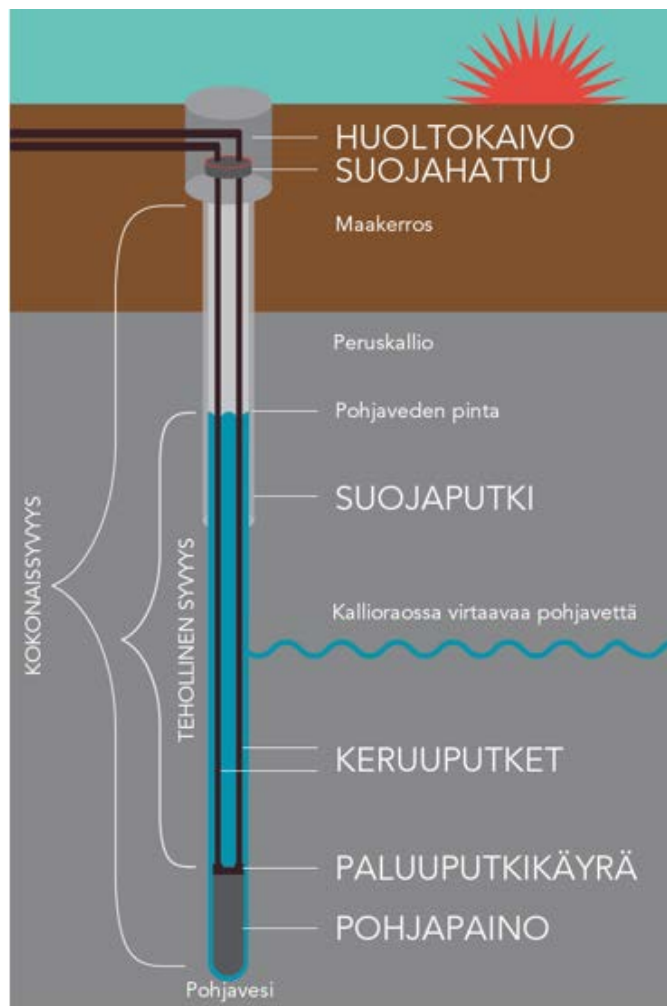
7.2 Maalämpöjärjestelmä

Maalämpöä voidaan kerätä maaperän pintaosista, syvemältä kallioperästä tai vesistöistä maalämpöpumpun sekä lämmönkeruupiirin avulla. Kallioperästä lämpöä kerätään lämpökaivojen avulla yleensä alle 200 m syvyydeltä. Yli 60 % maalämpökohteista toteutetaan lämpökaivoilla. Lämpökaivo on ulkohalkaisijaltaan 115-165 mm porakaivo, johon asennettavassa putkistossa lämmönkeruuliuos kiertää. Maaperästä kerätään lämpöä ilmastovyöhykkeestä riippuen noin metrin syvyydelle vaakatasoon asennettavan keruuputkiston, maapiirin, avulla. Maapiiri vaatii melko suuren asennus pinta-alan, noin $1,5 \text{ m}^2$ / putkimetri. Lämpökaivosta on mahdollista saada kaksinkertainen määrä energiaa putkimetriä kohden maapiiriin verrattuna. Lisäksi lämpökaivovaihtoehdossa vältetään mittavilta kaivutöiltä, mutta sen on lämmönkeruuvaihtoehtona yleensä myös kallein.



Kuva 20. Maalämmönkeruujärjestelmät: vasemmalla maapiiri ja oikealla lämpökaivo. [36]

Lämpökaivo yhdistyy itse maalämpöpumppuun keruuputken välityksellä. Keruuputki on porakaivon pohjalle asti ulottuva suljettu putkisto, jonka sisällä kiertää maalämmön välitykseen osallistuva jäätymätön lämmönsiirtoneste. Keruuputki ja lämmönsiirtoneste ovat kevyempiä kuin vesi, joten keruuputkisto lasketaan kaivon pohjalle painon avulla. Lämpökaivon yläosassa on suojaputki, jonka tehtävänä on estää pinnalta valuvien vesien ja irtoaineksen kulku kaivon kautta pohjaveteen. Lämpökaivo täytetään vedellä, jos se ei itsestään täyty pohjavedellä. Lopuksi kaivo suljetaan vesitiiviillä suojahatulla, joka estää pintavesien ja irtoaineksen kulun kaivoon sekä paineellisen pohjaveden purkautumisen ulos. [36] Maalämpöjärjestelmän tehollisella syvyydellä tarkoitetaan keruuputkiston osuutta, joka on pohjaveden peitossa. Pohjaveden syvyys riippuu sijainnista ja lisäksi siihen vaikuttavat myös esimerkiksi sateiden määrä. [37]

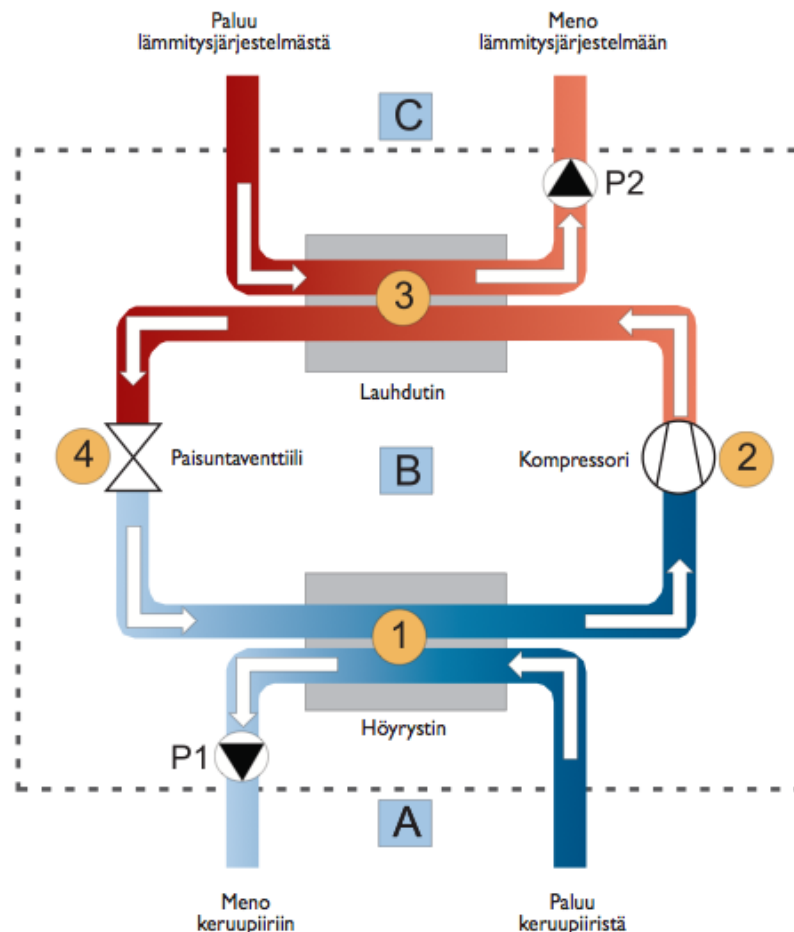


Kuva 21. Lämpökaivon rakenne. [37]

7.3 Maalämpöpumpun rakenne ja toimintaperiaate

Maalämpöpumpussa sähkömoottorikäyttöinen kompressorin muuttaa höyrystimen ja lauhduttimen avulla maaperästä lämmönkeruuputkistolla ja lämmönkeruunesteellä saatavan 1-4 asteisen lämmön 30-65- asteiseksi lämmöksi, jota voidaan edelleen käyttää esimerkiksi kiinteistöjen ja käyttöveden lämmittämiseen. Maalämpöpumppu toimii samalla periaatteella kuin jääkaappi. Maalämpöpumpussa kylmäaineen höyrystyminen sitoo energiaa ja puristettaessa höyryä korkeampaan paineeseen se lämpenee. Kun korkeassa paineessa ja lämpötilassa oleva höyry lauhtuu se luovuttaa energiaa. Kuvassa 22. on esitetty maalämpöpumpun toimintaperiaate. Lämmönkeruupiirissä lämmönkeruunesteeseen varastoitunut lämpöenergia siirtyy höyrystimessä lämpöpumpun kylmäaineeseen. Höyrystimessä kylmäaine kaasuuntuu lämmönkeruunesteen lämmityksen vaikutuksesta. Seuraavaksi kompressorin puristaa höyrystyneen kylmäaineen korkeampaan

paineeseen, jolloin se lämpenee. Höryfaasissa olevasta kylmäaineesta lämpöenergia siirretään lauhduttimella lämmitysjärjestelmässä kiertävään veteen. Kun kuumasta kylmäainehöyrystä otetaan lämpöä se tiivistyy takaisin kylmäainenesteeksi. Lämpöpumpun paisuntaventtiilissä kylmäaineen painetta alennetaan, jolloin sen lämpötila laskee. Nesteytynyt ja matalapaineinen kylmäaine jatkaa höyrystimeen ja kierto alkaa uudelleen. [38]



1. Höyrystimessä lämmönkeruupiiristä (A) lämpöenergia siirtyy lämpöpumpun kylmäainepiiriin (B).
2. Lämpöpumpun kompressori puristaa kylmäainehöyrystä korkeapaineiseksi kaasuksi, jolloin lämpötila kohoaa.
3. Lämpöpumpun lauhduttimessa lämpöenergia siirtyy kylmäaineesta rakennuksen lämmitysjärjestelmään (C).
4. Lämpöpumpun paisuntaventtiilissä kylmäaineen painetta alennetaan, jolloin neste muuttuu kylmäainehöyryksi ja sen lämpötila laskee. Kylmäainehöyry virtaa höyrystimeen ja prosessi jatkuu kohdan 1 mukaisesti.

Kuva 22. Maalämpöpumpun komponentit ja toimintaperiaate. Katkoviiva rajaa varsinaisen lämpöpumpun. [36]

Maalämpöpumppu tarvitsee sähköenergiaa toimiakseen vastaavalla tavalla kuin jääkaappikin. Maalämpöpumppu tarvitsee sähköenergiaa kolmanneksen tai neljännek-

sen tuottamaansa lämpöenergiaa kohden. Eli jokaista kilowattituntia sähköenergiaa kohden maalämpöpumppu tuottaa kolme tai neljä kilowattituntia lämpöenergiaa. Maalämpöpumpun ominaisuuksista yksi tärkein on lämmön tuoton energiatehokkuus eli hyötysuhde (COP-luku). Hyötysuhdetta ilmoitettaessa tarkastellaan kuinka paljon maalämpöpumppu tuottaa lämmitysenergiaa, silloin kun lämmönkeruuputkistossa saatava liuos on 0-asteista, ja maalämpöpumppu tuottaa joko 35-asteista tai 50-asteista vettä. Hyötysuhde on sitä alhaisempi mitä kuumempaa vettä lämpöpumpulla tuotetaan. Toisin sanoen maalämpöjärjestelmän hyötysuhde on paras mahdollinen silloin, kun lämpötilan nosto on mahdollisimman alhainen. [38]

7.4 Maalämpöjärjestelmän sijoitus ja mitoitus

Lämpökaivojen suunnittelussa tärkeimpiä huomioon otettavia asioita ovat lämpökaivojen sijoittaminen ja keruupiiriin mitoittaminen. Ennen poraustöitä on selvitettävä, onko lämpökaivojen rakentamista rajoitettu jollain tavalla kunnan määräyksissä tai muussa ohjeistuksessa. Joissain kunnissa esimerkiksi lämpökaivojen poraaminen pohjavesialueelle on kielletty. Lämpökaivojen paikkaa suunniteltaessa on huomioitava myös muun muassa maanpinnan alapuolella olevien rakenteiden sijainti, porauskaluston pääsy alueelle, lähistöllä olevat muut lämpö- ja talousvesikaivot sekä etäisyys rakennuksista. Taulukossa 8. on esitetty suositeltavia minimietäisyyksiä eri kohteisiin.

Taulukko 8. Lämpökaivon suositeltavat minimietäisyydet eri kohteisiin. [36]

Kohde	Suosittelu minimietäisyys
Lämpökaivo	20 m*
Porakaivo	40 m
Rengaskaivo	20 m
Rakennus	3 m
Kiinteistön raja	10 m*
Kiinteistökohtainen jätevedenpuhdistamo	Kaikki jätevedet 30 m, Harmaat vedet 20 m [17]
Viemärit ja vesijohdot	5 m

*porareian ollessa pystysuora

Lämpökaivojen välinen minimietäisyys voi olla myös pienempi, mikäli lämpökaivoja porataan vinoon. Suuret, kymmenien lämpökaivojen energiakentät vaativat suuren pinta-alan, jotta lämpökaivot saadaan sijoitettua tarpeeksi etäälle toisistaan. Pinta-alatarvetta on mahdollista pienentää poraamalla vinoreikiä. On myös hyvä huomioda, että valmiiden lämpökaivojen ja maassa kulkevien keruuputkien päälle ei tulisi tehdä muita rakennelmia. [36]

Maalämpöjärjestelmän mitoituksen lähtökohtana pidetään yleensä 40-60 % maksimitehotarpeesta, jolloin pystytään tuottamaan 80-90 % vuotuisesta lämmitysenergiatarpeesta. Lämpöpumppua ei normaalisti mitoiteta kattamaan rakennusten koko

lämmitysenergian tarvetta, koska tällöin käyttöaste jäisi liian alhaiseksi, jotta investointi olisi kannattava. Maalämpöpumppujen huipunkäyttöaika vaihtelee välillä 2000-3000 h ja käyttöikä on puolestaan pitkä noin 20 vuotta.[50] Rakennusten kokonaislämmöntarpeen perusteella valitaan kooltaan sopiva lämpöpumppu ja mitoitetaan maalämpöjärjestelmän komponentit. Mitoituksessa määritetään keruuputkiston pituus ja määrä. Keruuputkiston pituudessa tulee huomioida lämpökaivon kokonaissyvyys, tehollinen syvyys ja keruuputkiston vaakaosuus lämpökaivolta lämpöpumpulle. [36] Yhdestä porakaivosta on mahdollista saada rajallinen määrä lämpötehoa, yleensä noin 10-30 W porakaivometriä kohden. [37] Mikäli maalämpöjärjestelmä mitoitettaisiin tuottamaan puolet tarkasteltavasta Kolmenkulman 10 MW: tehotarpeesta, edellyttäisi maalämpöjärjestelmä (5 MW) noin 40 ha:n pinta-alaa. (Oletuksena: porakaivon syvyys on 200 m, lämpöteho porakaivometriä kohden on 25 W ja porakaivojen välinen minimietäisyys on 20 m). Suuren pinta-ala tarpeen vuoksi keskitetty maalämpöjärjestelmä ei ole kannattavin vaihtoehto Kolmenkulman alueella.

8 ENERGIA TUOTANTOMUOTOJEN KANNATTAVUUS JA TALOUDELLINEN TARKASTELU

Uusiutuviin energiatuotantomuotoihin liittyviin investointien houkuttelevuuteen vaikuttaa oleellisesti investoinnin taloudellinen kannattavuus. Investointien kannattavuuden arvioinnin lähtökohtana voidaan pitää investoinnilla saavutettavien tuottojen suhdetta investointiin liittyviin riskeihin. Investointilaskennan avulla pyritään selvittämään investoinnin kannattavuuteen liittyen tuottojen ja kustannusten ajallinen jakautuminen ja kuinka kauan pääoma on sidottuna investointiin.

Investointeihin ja investointilaskentaan liittyvien epävarmuuksien takia erilaisten investointeihin liittyvien riskien arvioiminen on myös hyvin olennainen osa investointilaskentaa. Investointeihin liittyviä riskejä on mahdollista arvioida herkkyysanalyysin avulla, jossa tarkastellaan määrättyjen parametrien muutoksen vaikutusta investoinnin kannattavuuteen. Investointilaskennan lähtöarvoja ovat kiinteät ja muuttuva kustannukset, juoksevat tuotot, käytettävä laskentakorkokanta sekä investoinnin pitoaika. Energiantuotantolaitosten kiinteät kustannukset koostuvat pääasiassa investoinnin aiheuttamista pääomakustannuksista sekä kiinteistä käyttö- ja kunnossapitokustannuksista. Muuttuvat kustannukset sisältävät mahdolliset polttoainekustannukset. Laskentakorkokanta vaikuttaa investointilaskelmissa diskonttaustekijän ja annuiteettikertoimen kautta investoinnin kannattavuuteen. Diskonttauksessa laskentakorkokanta on investoinnin minimituottovaatimus eli sen avulla otetaan huomioon rahan aika-arvo. Investoinnin laskentakorkokanta ja minimituottovaatimus pohjautuvat investoinnin kannattavuuden ja riskien suhteeseen. Investoinnin pitoajalla tarkoitetaan investointiajanjaksoa.

Tässä työssä kannattavuustarkastelut on tehty sisäisen korkonannon menetelmällä sekä takaisinmaksuajan menetelmällä. Sisäisen korkokannan menetelmässä haetaan sisäistä korkokantaa (IRR, Internal rate of return), jolla investoinnin nettonykyarvo on nolla. Eli menetelmässä etsitään suurinta korkokantaa, jolla investointi vielä maksaa itsensä takaisin. Investointi on kannattava mikäli sisäinen korkokanta on suurempi kuin investoinnilta vaadittavan tuotto-prosentti. Sisäisen korkokannan menetelmä kertoo kuinka suuri prosentuaalinen tuotto investoinnilla on mahdollista saavuttaa. Takaisinmaksuajan menetelmässä puolestaan selvitetään, kuinka nopeasti investoinnin netto-tuotot ylittävät perushankintakustannukset eli kuinka nopeasti investointi maksaa itsensä takaisin. Mitä lyhyempi takaisinmaksu-aika sitä kannattavammaksi menetelmä investoinnin määrittelee. Takaisinmaksuajan menetelmässä korostuu investoinnin rahoitusvaikutus eikä niinkään investoinnin potentiaaliset kokonaistuotot. [54]

8.1 Bioenergia

Tässä kappaleessa käydään esimerkinomaisesti läpi biovoimalaitosten kannattavuustarkastelun vaiheet ja lähtötiedot. Työssä käytetyt laskentatiedot ovat osittain salaisia, joten tässä esitettyjen laskelmien tarkoituksena on ainoastaan havainnollistaa biovoimalaitosta koskevan investointilaskennan muuttujia ja laskentaperiaatetta eikä niinkään antaa absoluuttista vastausta eri voimalaitosvaihtoehtojen kannattavuudesta.

Bioenergian hyödyntämisen osalta tarkastellaan seuraavat vaihtoehdot:

1. Hakelämpökeskus peruskuormalle (5 MW) + pellettilämpökeskus huippukuormalle (5MW) + varavoimalaitos (5 MW, öljyllä)
2. Haketta hyödyntävä ORC-voimalaitos peruskuormalle (5 MW) + pellettilämpökeskus huippukuormalle (5 MW) + varavoimalaitos (5 MW, öljyllä)

Konseptivaihtoehtojen kannattavuutta verrataan ns. nollavaihtoehtoon, joka tässä tarkastelussa on normaali kaukolämpö ja normaali verkkosähkö. Tässä vaihtoehdossa oletetaan, että Tampereen kaukolämpöyhtiö tekee tarvittavat investoinnit ja Kolmenkulman kiinteistöt maksavat ainoastaan liittymismaksut ja energiamaksun. Kaukolämmön hinta määritetään Tampereen kaukolämmön hinnan mukaan ja sähkön hinta puolestaan Tilastokeskuksen määrittämän keskihinnan mukaan. Koska kaukolämmön hinta sisältää kaukolämpöverkoston rakentamisen ja lämpöhäviöt, arvioidaan nämä kustannukset myös tarkasteltaville konsepteille.

Skenaariossa 2. kaukolämpöä ja sähköä sivutuotteena tuottava ORC-yhteistuotantolaitos voi lähtökohtaisesti olla kannattava vain, jos sähköstä saaduilla myyntituloilla saadaan katettua turbiinista, generaattorista ja muista investoinneista aiheutuvat lisäkustannukset. Muussa tapauksessa on kannattavampaa tuottaa pelkästään lämpöä. Laskennassa on huomioitu 9 %:n häviö aluelämpöverkossa. Taulukossa 9 on esitetty polttoaineiden sekä sähkö- ja lämpöenergian hinnat. Taulukossa 10 on esitetty lähtötietoja tarkasteltaville voimalaitostyypeille.

Taulukko 9. Polttoaineiden sekä sähkö- ja lämpöenergian hinnat.

<i>Polttoaineiden ja energian hinta (alv 0%)</i>		
Tampereen kaukolämpö	€/MWh	63
Nordpool sähkö	€/MWh	50
Hake	€/MWh	21,6
Pelletti	€/MWh	36,3

Taulukko 10. Lähtötietoja.

<i>Hyötysuhteet</i>		
Hakelämpökeskus	%	88
ORC-voimalaitos	%	88
Pellettilämpökeskus	%	90
Rakennusasteet		
ORC-voimalaitos	-	0,15
Muut muuttuvat kustannukset		
Hakelämpökeskus	€/MWh	
ORC-voimalaitos	€/MWh	
Pellettilaitos	€/MWh	
Muut vuotuiset kiinteät kustannukset		
Hakelämpökeskus	%-inv	
ORC-voimalaitos	%-inv	
Pellettilämpökeskus	%-inv	
Henkilöstötarve	Hlö	
Hakelämpökeskus	Hlö	
ORC-voimalaitos	Hlö	
Pellettilämpökeskus	hlö	
Keskim. henkilöstökustannukset	€/hlö/a	

Taulukossa 11 on esitetty sähkön ja lämmön tuotanto sekä polttoaineiden kulutukset eri tarkasteluvaihtoehdoissa. Lämmön tuotantomäärät perustuvat luvun 6.3.1. Kuvaajaan 17. Polttoaineiden kulutusta ja ORC-voimalaitoksen sähköntuotantoa on arvioitu hyötysuhteiden sekä ORC-voimalan rakennusasteen avulla.

Taulukko 11. Lämmöntuotanto eri tarkasteluvaihtoehdoissa.

<i>Lämmön tuotanto eri vaihtoehdoissa</i>	<i>VE 0</i>	<i>VE 1</i>	<i>VE 2</i>
Tampereen KL	MWh/a 26 000		
Hakelämpökeskus	MWh/a	24 706	
ORC-voimalaitos	MWh/a		22 100
Pellettilämpökeskus	MWh/a	1 294	3 900
Yhteensä KL-tuotanto	MWh/a	26 000	26 000
Tuotettu CHP-sähkö	MWh/a		3 900
Polttoaineiden kulutukset			
Hake	MWh/a	28 074	29 545
Pelletti	MWh/a	1 438	4 333
Yhteensä	MWh/a -	29 512	33 879

Koska kaukolämmön hinta sisältää verkoston rakentamiskustannukset ja lämpöhäviöt, arvioidaan vastaavat kustannukset myös muihin vaihtoehtoihin. Oletettu arvio Kolmenkulman aluelämpöverkon pituudesta on 20 km ja putkien keskikoko on DN 100. Pituusarvio perustuu Energiateollisuuden tilastoon, jonka mukaan alle 5 MW:n kaukolämpöverkoissa keskimäärin lämmön myynti/johtopituus (MWh/m) on 1,2. [63] DN 100 putkessa siirretään lämpöä noin 2 MW, joka olisi arviolta putkien keskiteho. DN 100 kaukolämpöjohdon arvioitu hinta on 212 €/m. [64] Kaukolämmön liittymismaksu on määritetty ison kerrostalon liittymismaksun mukaan. Energiateollisuuden tilaston (7/2013) mukainen liittymismaksu kulutettua lämpöä kohden on Tampereella 20 882 €/600 MWh. [65] Taulukossa 12 on esitetty arviot investoinneista eri tuotantovaihtoehdoille.

Taulukko 12. Investoinnit.

<i>Investoinnit (alv 0 %)</i>		VE 0	VE 1	VE 2
<i>Tuotantolaitokset</i>				
Hakelämpökeskus	€			
ORC-voimalaitos	€			
Pellettilämpökeskus	€			
Arvioitu investointituki yllämainituille			-15 %	-20 %
Varaöljykattila	€			
<i>Siirtoverkot</i>				
KL:n liittymismaksu	€	904 887		
Aluelämpöverkko	€			
Yhteensä	€	904 887		

Taulukossa 13 on esitetty lämmön tuotantokustannukset eri tarkasteluvaihtoehdoissa. Kustannusarviot perustuvat aikaisemmissa taulukoissa esitettyihin arvioihin. Aluelämpöverkon siirtohäviö (9 %) arvioidaan tuotettavaksi 50 % ajasta pelletillä ja 50 % ajasta hakeella. Kustannuksissa on otettu VE 2-vaihtoehdon osalta tuotettava sähkö negatiivisena kustannuksena eli tulona.

Taulukko 13. Tuotantokustannukset.

<i>Tuotantokustannukset (alv 0%)</i>		VE 0	VE 1	VE 2
<i>Polttoainekustannukset (ml. KL)</i>	€/vuosi			
Tampereen kaukolämpö	€/vuosi	1 645 800		
Hake	€/vuosi		553 402	638 181
Pelletti	€/vuosi		139 311	157 300
Lämpöhäviö (50/50 % hake/pelletti)	€/vuosi		33 033	33 033
<i>Muut kustannukset</i>				
Muut muuttuvat	€/vuosi			

Muut kiinteät	€/vuosi	
Henkilöstökustannukset	€/vuosi	
Sähkön myynti	€/vuosi	-195 000
Yhteensä	€/vuosi	1 645 800

Taulukossa 14 on esitetty kustannukset verrattuna vaihtoehto VE 0:aan sekä kannattavuuden tunnusluvut.

Taulukko 14. Kannattavuustarkastelu

Kannattavuuslaskenta (alv 0%), ero VE 0:aan		VE 0	VE 1	VE 2
Investointi	€	-		
Tuotantokustannukset	€/vuosi	-		
Takaisinmaksuaika (4 %)	Vuotta	-		
Nettonykyarvo (25 v, 4 %)	€	-		
Sisäinen korkokanta (25 v)	%	-		

Sekä lämpökeskusvaihtoehto (VE 1) että ORC-voimalaitosvaihtoehto (VE 2) ovat kannattavia, nettonykyarvo on suurempi kuin nolla. Paras kannattavuus saadaan lämpökeskusvaihtoehdolla, jonka takaisinmaksuaika on x vuotta.

Voimalaitosinvestointi on suuri, mistä aiheutuu taloudellista riskiä. Pitkällä aikavälillä tarkasteltuna oma lämpökeskusvaihtoehto on kuitenkin edullisin. Tarkasteltavat vaihtoehdot ovat kaupallisia ratkaisuja, joten niihin liittyvän teknisen riskin voidaan olettaa oleva vähäinen. Voimalaitosten turvallinen ja asianmukainen käyttö vaatii osaamista. Kaukolämpöön liittymisen riskinä on käytännössä ainoastaan lämmön hinnan nousu, mutta kaukolämpöön liittyminen ei kuitenkaan sulje pois mahdollisuutta paikallisen tuotannon hyödyntämiseen myöhemmässä vaiheessa. Voimalaitosinvestointin vahvuuksina voidaan pitää edullista polttoaineen hintaa, voimalaitosten korkeaa kotimaisuusastetta sekä vaikutusta paikalliseen työllisyyteen. Heikkouksia puolestaan ovat pitkähkö takaisinmaksuaika kaukolämpöön verrattuna sekä olemassa olevan kaukolämpöinfrastruktuurin puute Kolmenkulman alueella. Voimalaitosvaihtoehtojen kannattavuuteen vaikuttaa oleellisesti mm. muutokset poliittisissa päätöksissä, jolloin mitataan voimalaitosinvestointiin liittyy merkittäviä poliittisia riskejä. Voimalaitosinvestointien uhkina voidaan tässä tarkastelussa pitää myös hidasta kaukolämpökuorman kehitystä sekä heikkoa yleistä taloudellista tilannetta.

8.2 Aurinkosähkö

Työssä käytetyt aurinkosähköjärjestelmän investointikustannusta koskevat tiedot ovat salaisia. Investointikustannusta on seuraavassa laskentaesimerkissä arvioitu Pvrresources- sivuston pohjalta, jonka mukaan tyypilliset investointikustannukset megawatti-

kokoluokan järjestelmille vuonna 2010 ovat olleet luokkaa 2000-4000 €/kW. Aurinkosähköjärjestelmän tuotantokustannus muodostuu pääosin investointikustannuksesta. Käyttökustannuksiin lukeutuvat huolto-, kunnossapito, uusinta- ja romutuskustannukset. Huolto- ja käyttökustannukset ovat tyypillisesti luokkaa 0,02-0,1 snt/kWh. [53] Nämä kustannukset riippuvat merkittävästi järjestelmän koosta ollen noin 1% investointikustannuksista. Seuraavissa laskelmissa ei ole huomioitu aurinkosähköjärjestelmän maanalan hankinnasta tai sähköverkkoon liittymisestä aiheutuvia kustannuksia. 1 MW:n aurinkosähköjärjestelmä on voimalaitos kokoluokassa suhteellisen pieni, jolloin verkkoon liittymisparametreja kuten esimerkiksi taajuuden säätely, toiminta jännitevaihteluiden aikana jne. ei tarvitse säätää. Sähkön varastointijärjestelmä ei siis ole välttämätön verkon toiminnan kannalta. Kustannuslaskelmissa ei huomioida sähkön varastointijärjestelmää.

Alla olevassa taulukossa on esitetty tarkasteltavan aurinkosähköjärjestelmän esimerkkitilanteen kannattavuuslaskennassa käytettävät lähtötiedot sekä takaisinmaksuaika ja nettonykyarvo.

Taulukko 15. Aurinkosähköjärjestelmän kannattavuustarkastelu.

Voimalan koko	1 MW
Vuotuinen energian tuotto	850 - 1000 MWh
Investointikustannus	2,0 - 4,0 M€
Arvioitu investointituki	30 %
Huolto- ja käyttökustannukset	170 €/a (0,2 €/MWh)
Käyttöaika	25 a
Sähkön hinta	50 €/MWh
Takaisinmaksuaika (4 %)	-
Nettonykyarvo (25 v., 4 %)	x €

Aurinkosähkövoimalan nettonykyarvo 25 vuoden pitoajalla ja 4 %:n tuottovaatimuksella on negatiivinen. Nykyarvomenetelmän mukaan investointi ei siis ole kannattava. Investointi ei myöskään maksa itseään takaisin noin 25 vuoden käyttöaikana 4 %:n tuottovaatimus huomioituna. Aurinkosähkön tuotanto on niin vähäistä verrattuna investointiin, että vuosittaiset nettotuotot jäävät pieniksi, vaikka voimalan juoksevat kustannukset ovatkin lähes olemattomat. Aurinkosähkön kannattavuutta parantaisi korkeamman sähkön hinnan sekä suuremman tuotantomäärän ohella pienempi investointikustannus ja mahdollinen tuotantotuki. Esimerkiksi Saksassa, jossa aurinkosähköä on tuettu voimakkaasti, syöttötariffi aurinkosähkölle on ollut 1 MW:n järjestelmillä 12,75 €/MWh kesäkuussa 2012. Aurinkosähköjärjestelmien hinta Saksassa on ollut lokakuussa 2012 noin 1 750 €/kW. Saksassa sähköenergian hinta on myös korkeampi kuin Suomessa (teollisuudelle sähkön hinta vuonna 2012 on ollut noin 63 €/MWh). [66,67,68]

9 YHTEENVETO

Diplomityön tavoitteena oli selvittää uusiutuvien energiamuotojen hyödyntämismahdollisuuksia Läntiselle Tampereen Kolmenkulman alueelle rakentuvan teollisuus- ja yritysalueen energiantuotannossa. Alueen lämpötehoksi on määritetty 10 MW ja tarkastelussa alue on oletettu lämmön suhteen omavaraiseksi.

Uusiutuvaksi energiaksi luetaan energiatuotantomuodot, joissa primäärienergian lähdettä voidaan inhimillisillä mittasuhteilla katsottuna pitää loputtomana. Uusiutuvista energiamuodoista tässä työssä tarkasteltiin tuulivoima, maalämpö, aurinkosähkö, aurinkolämpö ja bioenergian hyödyntäminen. Uusiutuvan energian käyttöön vaikuttavat EU:ta koskevat yhteiset päätökset ja direktiivit, kuten kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen tähtäävä päästökauppadirektiivi sekä Suomen omat energia- ja ilmastopoliittiset linjaukset. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen on yksi keskeinen syy uusiutuvan energian käytön lisäämiselle. Suomi on asettanut uusiutuvien energialähteiden osuudelle energian loppukulutuksesta tavoitteeksi 38 %:a vuoteen 2020 mennessä. Suomessa uusiutuvien energiamuotojen tukimallit perustuvat investointitukiin ja tuotantotukiin eli niin sanottuihin syöttötariffeihin. Näillä tukimuodoilla pyritään varmistamaan, että Suomen tavoite tuottaa 38% energiasta uusiutuvilla energialähteillä vuoteen 2020 mennessä saavutetaan. Uusiutuvan energian käyttöön liittyvät ohjeelliset tukiprosentit vuodelle 2013 ovat aurinkosähköhankkeilla noin 30 % ja biomassaa hyödyntäville lämpökeskuksille 10-15 %.

Aurinkoenergia on auringon säteilyenergian hyödyntämistä sähkö- tai lämpöenergiana. Aurinkoenergiaa hyödynnetään sähköntuotannossa aurinkokennojen avulla. Kolmenkulman alueelle soveltuva keskitetty aurinkosähköjärjestelmä olisi kiinteä ja asennettu maahan osoittamaan etelään päin. Aurinkosähköjärjestelmä koostuu aurinkopaneeleista, invertteristä ja keskijännitemuuntajasta. Aurinkosähköjärjestelmän energiantuotanto riippuu oleellisesti mm. sijoituspaikan auringon säteilyintensiteetistä sekä aurinkopaneelien kallistuskulmasta ja suuntauksesta. Koska potentiaalisesta sijoituspaikasta ei ollut saatavilla meteorologista dataa, on sijoituspaikalle osuvan auringon säteilyenergian arvioinnissa käytetty PVGIS-ohjelmistoa.

Aurinkolämmön osalta tässä työssä tarkasteltiin keskitettyä järjestelmää kaukolämmön tuotannossa. Keskitetyn aurinkolämpöjärjestelmän taloudellinen kannattavuus riippuu siitä, mitä polttoainetta aurinkolämpö korvaa kaukolämmön tuotannossa. Yhteenvetona voidaan todeta, että Suomessa aurinkolämmön tuotantokustannukset ovat pääosin kaukolämmön muuttuvia tuotantokustannuksia korkeammat. Eli aurinkolämpö ei ole kannattava tarkasteluvaihtoehto keskitetyn kaukolämmön tuotantoon Kolmenkulman alueella.

Kolmenkulman alueen soveltuvuutta tuulivoimatuotantoon on arvioitu Pirkanmaan liiton laatiman Voimaa tuulesta Pirkanmaalla -selvityksen perusteella. Voimaa tuulesta Pirkanmaalla -selvityksen tavoitteena on ollut löytää Pirkanmaalla tuulivoimatuotantoon parhaiten soveltuvia alueita. Kolmenkulman alue ei ole ollut mukana selvityksen tarkasteltavien tuulivoima-alueiden joukossa, koska se ulottuu niin lähelle Pirkalan lentokenttää, jolloin alue jää kentän 18 km suojavaähykkeen sisään. Mikäli tälle suojavaähykealueelle suunnitellaan korkeita rakennuksia, tulee alueelle hakea Finavialta lentoestelupaa. On todennäköistä, että lupaa tuulivoimarakentamiselle ei myönnettäisi tai jos lupa myönnettäisiin, niin alueelle rakennettavien rakennusten korkeus olisi rajattu. Edellä mainitut tekijät osoittavat, että Kolmenkulman alue ei ole paras mahdollinen tuulivoiman hyödyntämiseen teollisessa kokoluokassa.

Maalämmössä hyödynnetään maa- ja kallioperän pintaosiin varastoitunutta lämpöenergiaa, joka on peräisin auringosta. Yhdestä porakaivosta on mahdollista saada rajallinen määrä lämpötehoa, yleensä noin 10-30 W porakaivometriä kohden. Maalämmön hyödyntämismahdollisuuksia keskitettynä lämmöntuotantovaihtoehtona Kolmenkulman tapauksessa heikentää maalämpöjärjestelmän edellyttämä suurehko maa-alue. Maalämpöjärjestelmällä on lisäksi epätaloudellista tuottaa kaukolämpöveden edellyttämää menolämpötilatasoa 80-110 °C.

Bioenergia on puhdasta, hiilidioksidineutraalia ja ympäristöystävällistä uusiutuvaa energiaa. Bioenergiaa saadaan biopolttoaineista, joihin lukeutuvat biomassasta eli eloperäisestä, fotosynteesin kautta syntyneistä kasvimassoista valmistetut polttoaineet. Bioenergiaa on mahdollista hyödyntää energiantuotannossa vapauttamalla biomassoihin sitoutunut energia polttamalla. Bioenergiaa tuottavat voimalaitokset ovat joko pelkistään lämpöä tai höyryä tuottavia lämpö- /höyrykeskuksia tai sähköä ja lämpöä/höyryä tuottavia yhteistuotanto voimalaitoksia. 10 MW:n kokoluokassa kannattava tarkasteluvaihtoehto on lähtökohtaisesti pelkistään lämpöä tuottava lämpökeskus. Tarkasteluihin otettiin mukaan myös ORC-yhteistuotantovoimalaitos, jossa on pienemmät investointi- ja käyttökustannukset perinteiseen höyryvoimaproessiin verrattuna alhaisemmasta höyrystymislämmöstä ja edelleen matalammasta painetasosta johtuen. Biopolttoainetta käyttävissä voimalaitoksissa ja lämpökeskuksissa Arinapoltto on yleisin polttotapa alle 10 MW:n kokoluokassa.

Koska kaukolämmön huipputehon tarve on lyhytaikainen, rakennetaan kalliit lämmitysvoimalaitokset ja kiinteän polttoaineen lämpökeskukset niin, että niiden teho on noin 50 % kaukolämpöverkkoon liitettyjen kuluttajien laitteiden maksimitehosta. Loppuosa tehotarpeesta on hoidettu perinteisesti öljykäyttöisillä lämpökeskuksilla. Tällä tavoin isolle voimalaitosinvestoinnille saadaan taloudellisesti kannattava, riittävän pitkä käyttöaika. Valtaosa kaukolämmön tarpeesta saadaan nyt tuotettua edullista polttoainetta käyttävällä (tässä työssä hake) voimalaitoksella alhaisin käyttökustannuksin, ja vain pieni osa lämmöntarpeesta (noin 10 %) jää jäljelle tuotettavaksi kallista polttoainetta (tässä työssä pelletti) käyttävillä mutta investointikustannuksiltaan edullisilla huippulämpökeskuksilla.

Työn lopussa esiteltiin investointeihin liittyvän kannattavuuslaskennan perusperiaatteet ja laskennassa käytettävät muuttujat. Kannattavuuslaskelmat käydään läpi esimerkinomaisesti ja laskelmien tarkoituksena onkin havainnollistaa biovoimalaitosta koskevan investointilaskennan muuttujia ja laskentaperiaatetta eikä niinkään antaa absoluuttista vastausta eri voimalaitosvaihtoehtojen kannattavuudesta.

Aurinkosähkön osalta tarkasteltiin keskitettyä 1 MW:n järjestelmää. Bioenergian osalta tarkasteltiin kahta eri skenaariota. Ensimmäisessä skenaariossa Kolmenkulman lämmöntuotannon peruskuorma ajatellaan tuotettavan 5 MW:n hakelämpökeskuksella ja huippukuorma 5 MW:n pellettilämpökeskuksella. Toisessa skenaariossa peruskuorma tuotetaan 5 MW:n ORC-voimalalla ja huippukuorma 5 MW:n pellettilämpökeskuksella. Molemmissa vaihtoehdoissa on otettu tarkasteluun mukaan öljykäyttöinen varalämpökeskus (5 MW). Bioenergian osalta skenaariovaihtoehtojen kannattavuutta verrataan ns. nollavaihtoehtoon, joka tässä tarkastelussa on normaali kaukolämpö ja normaali verkkosähkö. Koska kaukolämmön hinta sisältää kaukolämpöverkoston rakentamisen ja lämpöhäviöt, arvioidaan nämä kustannukset myös tarkasteltaville konsepteille.

LÄHTEET

- [1] Ilmasto-opas.fi. 2013. Uusiutuva energia Suomessa. [WWW]. [Viitattu: 22.3.2013]. Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/0bd05ecc-8c68-4fb6-a6e9-2c4ad90d577d/uusiutuva-energia.html>

- [2] Kansallinen energia- ja ilmastostrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle, 2013. [WWW]. [Viitattu 2.4.2013] Saatavissa: http://www.tem.fi/files/36266/Energia_ja_ilmastostrategia_nettiljulkaisu_SUOMENKIELINEN.pdf

- [3] Motivan kotisivut. Uusiutuva energia. [www]. [Viitattu 2.4.2013]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia

- [4] Energiateollisuus ry:n raportti. Uusiutuvan energian tuet EU-maissa. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/energiateollisuus_raportti_28_9_2011_2.pdf

- [5] Työ- ja elinkeinoministeriön kotisivut. Uusiutuvan energian syöttötariffi. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: <http://www.tem.fi/index.phtml?s=3256>

- [6] Porvoon kotisivut. Skaftkarr-hanke. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: http://www.porvoo.fi/fi/palvelut/rakentaminen_ja_kaavoitus/kaavoitus/kaupunki_kehityshankkeet/skaftkarr

- [7] Skaftkarr-hankkeen esite. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: http://www.skaftkarr.fi/easydata/customers/skaftkarr/files/skaftkarr/esite/esite_suomi_kevyt.pdf

- [8] Motivan julkaisu. Hajautettu ja paikallinen energiantuotanto loppuraportti. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/4458/Hajautettu_ja_paikallinen_energiantuotanto_loppuraportti.pdf

- [9] Ely-keskuksen Skaftkarr-hankkeen esite. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: http://www.elykeskus.fi/fi/ELYkeskukset/varsinaissuomenely/Ajankohtaista/Kaavoituksen%20ajankohtaispiv%20762011/Maank%C3%A4ytt%C3%B6%202011_Skaftk%C3%A4rr_MR_Kontio.pdf

- [10] Ilmastotavoitteita toteuttava asemakaavoitus. Kimmo Lylykangas. Aalto-yliopisto. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: http://www.skaftekarr.fi/easydata/customers/skaftekarr/files/seminaariaineistot/ilmastotavoitteita_toteut/nettiin_lylykangas_ilmastotavoitteita_toteuttava_asemakaavoitus_02102012.pdf
- [11] Skaftekarr-hankeen julkaisuja. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: http://www.skaftekarr.fi/easydata/customers/skaftekarr/files/seminaariaineistot/ilmastotavoitteita_toteut/patrick_wackstrom_porvoo_energia_oy_2.10.2012.pdf
- [12] RAKLI:n julkaisu. Östersundom-klinikan tulokset. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: <http://www.rakli.fi/attachements/2013-01-25T14-56-2265.pdf>
- [13] Matti Visanti. Östersundom ja aurinkoenergia seminaariesitelmä. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: http://asuminen.lahtisbp.fi/easydata/customers/asuminenlahtisbp/files/liitetiedosto/saa_ja_ilmastoseminaari/ostersolarilmatiet05032013.pdf
- [14] Pirkanmaan liiton tuulivoimaselvitys. Voimaa tuulesta Pirkanmaalla. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: <http://maakuntakaava2040.pirkanmaa.fi/sites/default/files/Tuulivoimaselvitys.pdf>
- [15] Voimaa tuulesta Pirkanmaalla-tuulivoimaselvityksen tavoitteet ja menetelmät. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: http://maakuntakaava2040.pirkanmaa.fi/sites/default/files/Tavoitteet_ja_menetelm%C3%A4t.pdf
- [16] Motivan julkaisu. Tuulivoiman projektiopas. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/files/228/tuulivoimanprojektiopas.pdf>
- [17] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi. 2001. Wind energy handbook. 1. painos. Chichester, Wiley. 617 s.
- [18] A. Mäki. Kurssin svt-3440 kurssimateriaali. [WWW]. [Viitattu 2.5.2011].
- [19] Mike Hughes, Nick Jenkins, Olimpo Anaya-Lara, Janaka Ekanayake, Phil Cartwright. 2009. Wind energy generation, Modelling and control. 1.painos. John Wiley & Sons ltd. 290 s.

- [20] J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers. 2002. Wind energy explained-Theory design and application. 1. painos. John Wiley & Sons Ltd. 590 s.
- [21] Gaia consulting. Aurinkolämmön mahdollisuudet kaukolämpöjärjestelmässä. 2011.
- [22] Anne Mäkynen. Suunnitteluinsinööri, Pirkanmaan liitto. Sähköposti-viesti.
- [23] Bioenergia Suomessa kotisivut. Biopolttoaineet. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: <http://www.finbioenergy.fi/default.asp?SivuID=9166>
- [24] BMH:n kotisivut. Tyrannosaurus jätteenkäsittely laitos. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: <http://www.bmh.fi/solutions/waste-to-energy/tyrannosaurus-srf-production-plants/>
- [25] Editori, B2B asiantuntijakanavan artikkeli. Tyranosauruksella jätteistä puhdasta energiaa. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: www.editori.fi/syyskuu-2011/yrityskortit-syyskuu-2011/tyrannosauruksella-jatteista-puhdasta-energiaa/
- [26] BMH:n Tyrannosaurus laitosesittely. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: <http://www.optieng.com/media/representadas/bmh.cimento.en.pdf>
- [27] Cement seminar. 2011. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: http://www.cementseminar2011-atecgreco.com/palestras/p_13.pdf
- [28] Aki Korpela. Aurinkosähkön luonnontieteelliset perusteet- luentomoniste. 2012.
- [29] Kolmannen sukupolven aurinkokennon kovassa nousukiidossa-artikkeli. [WWW]. [Viitattu 11.5.2013]. Saatavissa: <http://www.aka.fi/fi/T/Tiede uutiset2/Tata-tutkimme/Aiemmin-julkaistut-jutut/Kolmannen-sukupolven-aurinkokennot-kovassa-nousukiidossa/>
- [30] Erat, B. Erkkilä, V. Nyman, C. Peippo, K. Peltola, S. Suokivi, H. 2008. Aurinko-opas, aurinkoenergiaa rakennuksiin. Aurinkoteknillinen yhdistys ry.
- [31] Aurinkosähköopas tamperelaisille. [WWW]. [Viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: http://www.tampere.fi/material/attachments/a/6Gkg9C2MG/Aurinkosahkoopas_36660_vedos.pdf
- [32] Aurinkosähkön mahdollisuudet Helsingin Östersundomin alueella. VTT:n tutkimusraportti. 2010.

- [33] Alanen, Koljonen, Hukari, Saari. VTT: julkaisu: Energian varastoinnin nykytila. 2003
- [34] PVGIS-tietojärjestelmä
- [35] Aurinkovoimala Helsingin kaupungin Östersundomiin- Esiselvitys. Helsingin kaupunki. 2012
- [36] Lämpökaivo- Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas, Anne Juvonen. 2009. [WWW]. [Viitattu 25.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=108597&lan=fi>
- [37] Geodrillin kotisivut. [WWW]. [Viitattu 27.6.2013]. Saatavissa: www.geodrill.fi
- [38] Maalämpöjärjestelmän kuvaus Senera Oy:n kotisivuilla. [WWW]. [Viitattu 27.6.2013]. Saatavissa: <http://www.senera.fi/Maalampo/Maalampopumppu/>
- [39] Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. Suomen ympäristökeskus. 2003.
- [40] Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. Energiategollisuus, ympäristöministeriö. 2012.
- [41] Energiatekniikan perusteet, luentomoniste. Risto Raiko, Katriina Kivelä. 2007
- [42] Fischer-tropsch- menetelmän kuvaus Bioste Oy:n kotisivuilla. [WWW]. [Viitattu 27.6.2013]. Saatavissa: http://www.bioste.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=14
- [43] St1:n kotisivut. [WWW]. [Viitattu 27.6.2013]. Saatavissa: <http://www.st1.fi/tuotteet/re85>
- [44] Nils-Olof Nylund. Liikenteen biopolttoaineet. Energiatekniikan tutkijakoulun vuosiseminaari. 2008. [WWW]. [Viitattu 30.7.2013]. Saatavissa: http://energia.aalto.fi/fi/ajankohtaista/uutiset/est_vuosiseminaari_08_nylund.pdf
- [45] Tiina Eskola. Biodieselin ja bioetanolin valmistusmenetelmät ja ympäristövaikutukset. Opinnäytetyö 2012.
- [46] Kolmenkulman yritysalueen esittely. [WWW]. [Viitattu 30.7.2013]. Saatavissa: <http://www.kolmenkulma.fi/kolmenkulman-esittely/logistinen-napakymppi/>

- [47] Kolmenkulman yritysalueen esittely. [WWW]. [Viitattu 30.7.2013]. Saatavissa: <http://nokiankaupunki-fi-bin.directo.fi/@Bin/0f56194fb835955a5069e2b052a00858/1375256155/application/pdf/2842292/Nokia%20kolmenkulma%20%282%29.pdf>
- [48] Lämmitystarveluvut. Ilmatietoon laitos. [WWW]. [Viitattu 30.7.2013]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>
- [49] Senera Oy:n kotisivut. [WWW]. [Viitattu 27.6.2013]. Saatavissa: http://www.senera.fi/Vaihda_oljylammitys_maalampoon_ja_teet_elamasi_parhaan_sijoituksen/Usein_kysytyt_kysymykset/
- [50] Hajautettu energiantuotanto, Co2-päästöt. Gaia group Oy. 2002
- [51] Energiatehokkuus kaavoituksessa, kaavarunkovaiheen loppuraportti. Sitran selvityksiä.
- [52] Aurinkolämmön liiketoimintamahdollisuudet kaukolämmön yhteydessä Suomessa. Työ- ja elinkeinoministeriö, Energiateollisuus Oy. 2013.
- [53] Aurinkosähkön investointikustannuksia. [WWW]. [Viitattu 2.9.13]. Saatavissa: <http://www.pvresources.com/Economics/Investment.aspx>
- [54] Huhtinen, Korhonen, Pimiä, Urpalainen. Voimalaitostekniikka. Opetushallitus. 2013.
- [55] Raiko, Kirvelä. Energiatekniikan perusteet luentomoniste. Tampereen teknillinen yliopisto. 2007
- [56] Sankey diagrammit. [WWW]. [Viitattu 2.9.13]. Saatavissa: <http://www.sankey-diagrams.com/combined-heat-power-chp-sankey/>
- [57] Kaukolämmön tuotanto ja polttoaineet. Energiateollisuus ry. [WWW]. [Viitattu 2.9.13]. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/tuotanto-ja-polttoaineet>
- [58] ECO₂-hankkeen toteutussunnitelma. 2012
- [59] Tampereen sähkölaitoksen vuosiraportti. 2012

- [60] ORC-voimalan soveltuvuus hyödyntämään dieselvoimalan hukkalämpöä. Tutkimusraportti. 2000. [WWW]. [Viitattu 2.9.13]. Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/31012/TMP.objres.366.pdf?sequence=1>
- [61] ORC-voimala koskeva uutisartikkeli. Yle uutiset. [WWW]. [Viitattu 2.9.13]. Saatavissa: http://yle.fi/uutiset/maan_ensimmainen_orc-voimala_kohosi_toholammille/6572078
- [62] Tyypillisiä polttoaineiden tehollisia lämpöarvoja. Kojonkulman hake Oy. [WWW]. [Viitattu 2.9.13]. Saatavissa: <http://www.hake.fi/lampokeskus/polttoaineidenlampoarvoja/>
- [63] http://energia.fi/sites/default/files/images/kayttotaloudelliset_tunnusluvut_2011.pdf
- [64] http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/39019/Muikkula_Pekka.pdf?sequence=1
- [65] Kaukolämmön hinta (1.7.2013). Energiateollisuus ry. [WWW]. [Viitattu 20.11.2013]. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/hinta_010713.pdf
- [66] Saksan aurinkosähkön tuki. Renewables international nettisivusto. [WWW]. [Viitattu 20.11.2013]. Saatavissa: <http://www.renewablesinternational.net/german-pv-drops-to-15-cents-max/150/510/62457/>
- [67] Aurinkosähköjärjestelmän kustannus Saksassa. Tekniikka ja talous. [WWW]. [Viitattu 20.11.2013]. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/blogit/energia/aurinkosahko+ndash+haihattelua+vai+energiaalan+revoluutio/a870829>
- [68] Sähkön hinta Saksassa. Eurostat. [WWW]. [Viitattu 20.11.2013]. Saatavissa: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php?title=File:Half-yearly_electricity_and_gas_prices.png&filetimestamp=20131106132508